



**TUGAS AKHIR- TM141585**

**STUDI NUMERIK PENGARUH JENIS MATERIAL DAN LUAS  
PERMUKAAN FIN TERHADAP PERFORMA *CIRCULAR  
FINNED TUBE SUPERHEATER* PADA *BOILER HRSG*  
PLTGU PT. PJB UP. GRESIK**

**I GDE AGUNG CHANDRA SATRIYA WIBAWA  
NRP. 2111 100 134**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng**

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



***FINAL PROJECT - TM141585***

***NUMERICAL STUDY OF FIN'S MATERIAL AND SURFACE  
AREA EFFECT TO CIRCULAR FINNED-TUBE  
SUPERHEATER PERFORMANCE ON COMBINE-CYCLE  
POWER PLANT BOILER PT. PJB UP. GRESIK***

**I GDE AGUNG CHANDRA SATRIYA WIBAWA**  
**NRP. 2111 100 134**

**Advisor**  
**Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng**

***MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT***  
***Fakulty of Industrial Technology***  
***Sepuluh Nopember Institute of Technology***  
***Surabaya 2016***

**STUDI NUMERIK PENGARUH JENIS MATERIAL DAN  
LUAS PERMUKAAN FIN TERHADAP PERFORMA  
CIRCULAR FINNED TUBE SUPERHEATER PADA  
BOILER HRSG PLTGU PT. PJB UP. GRESIK**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**I GDE AGUNG CHANDRA SATRIYA WIBAWA**

**NRP. 2111 100 134**

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng. .... (Pembimbing)  
(NIP. 196505051990031005)
2. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W, ME ..... (Penguji I)  
(NIP. 195312191981031001)
3. Ary Bachtiar K.P., ST, MT, PhD. .... (Penguji II)  
(NIP. 197105241997021001)
4. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT ..... (Penguji III)  
(NIP. 197104051997021001)

**SURABAYA**

**Januari, 2016**

# **STUDI NUMERIK PENGARUH JENIS MATERIAL DAN LUAS PERMUKAAN FIN TERHADAP PERFORMA CIRCULAR FINNED TUBE SUPERHEATER PADA BOILER HRSG PLTGU PT. PJB UP. GRESIK**

**Nama : I Gde Agung Chandra Satriya Wibawa**  
**NRP : 2111100134**  
**Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng**

## **ABSTRAK**

*Fin merupakan sebuah perpanjangan luas permukaan, dipasang untuk meningkatkan laju perpindahan panas dengan cara meningkatkan luasan permukaan yang dilewati oleh fluida kerja. Pada boiler Heat Recovery Steam Generator (HRSG) Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) PT. PJB UP. Gresik menggunakan circular finned tubes pada superheater heat exchanger. Fin meningkatkan unjuk kerja superheater heat exchanger dan sistem pembangkit secara keseluruhan. Performa fin dipengaruhi oleh berbagai macam faktor yaitu material fin, ketebalan fin, dan lebar fin.*

*Penelitian dilakukan dengan menganalisis karakteristik perpindahan panas pada tubes superheater dengan dan tanpa menggunakan fin, dan membandingkan performa fin dengan memvariasikan jenis material fin, ketebalan fin dan lebar fin. Fluida kerja yang digunakan berupa flue gas dengan kecepatan 10.611 m/s yang dimodelkan sebagai gas ideal yang mengalir pada sisi eksternal finned tube superheater. Studi numerik dilakukan secara 3 (tiga) dimensi dengan kondisi aliran steady, incompressible dan turbulen dengan prinsip Computational Fluid Dynamic (CFD) menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6 untuk tahapan pembuatan domain dan disimulasikan dalam perangkat lunak FLUENT 6.3.26.*



*Hasil studi numerik menunjukkan penambahan fin pada circular tube superheater meningkatkan nilai laju perpindahan panas. Penambahan lebar fin akan meningkatkan nilai temperatur rata-rata pada luas permukaan fin dan lebar fin optimum adalah 59.23 mm. Penambahan tebal fin mengurangi temperatur rata-rata pada luas permukaan fin. Penambahan nilai koefisien konduksi pada material fin meningkatkan nilai temperatur rata-rata pada luas permukaan fin, dan variasi material terbaik adalah menggunakan carbon steels (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ). Nilai efisiensi dan efektifitas circular finned tube superheater tidak dapat dicari dengan menggunakan persamaan efisiensi dan efektifitas fin secara konduksi, konveksi dan persamaan Bessel.*

**Kata kunci : Circular Finned Tube, HRSG, Perpanjangan Luasan, Superheater.**

# **NUMERICAL STUDY OF FIN'S MATERIAL AND SURFACE AREA EFFECT TO CIRCULAR FINNED-TUBE SUPERHEATER PERFORMANCE ON COMBINE-CYCLE POWER PLANT BOILER PT. PJB UP. GRESIK**

**Name : I Gde Agung Chandra Satriya Wibawa**  
**NRP : 2111100134**  
**Department : Mechanical Engineering FTI-ITS**  
**Supervisor : Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng**

## **ABSTRACT**

*Fin is an extended surface, commonly used to enhance heat transfer between a solid and an adjoining fluid. Combine-cycle boiler PT. PJB UP. Gresik used circular finned tubes superheater heat exchanger. The term of fins is used to increase superheater heat exchanger performance in particular and overall power plant performance. Fin's performance are affected by many factor such as fin's types of material and surface area*

*Research aims to analyze heat transfer characteristic on superheater tubes with and without fins, and compare the fin's performance by varying fin's types of material and surface area. The working fluid is flue gas at a speed of 10.611 m/s which is modeled as an ideal gas that flow in the external side of the finned tube superheater. Numerical study conducted in three dimensions with a steady flow condition, incompressible and turbulent with the principles of Computational Fluid Dynamic (CFD) software using GAMBIT 2.4.6 dan FLUENT 6.3.26*

*The result of numerical studies show the addition of the circular finned-tube superheater increase the rate of heat transfer. The addition of fin's width will increase average temperature on fin's surface area and the optimum width is 59.23 mm. The addition of fin thickness reducing average temperature on fin's surface area. The addition of conduction coefficient on fin's material increases average temperature on fin's surface area and the best*

*variation of material is use carbon steels (plain carbon ,  $\leq 1 \% \text{ Mn}$  ,  $\text{Si} \leq 0.1 \%$  ). Efficiency and effectiveness of circular finned-tube superheater can't solve by using the efficiency and effectiveness equation based on conduction, convection and Bessel equation*

**Key Word : Circular Finned Tube, Extended Surface, HRSG, Superheater.**

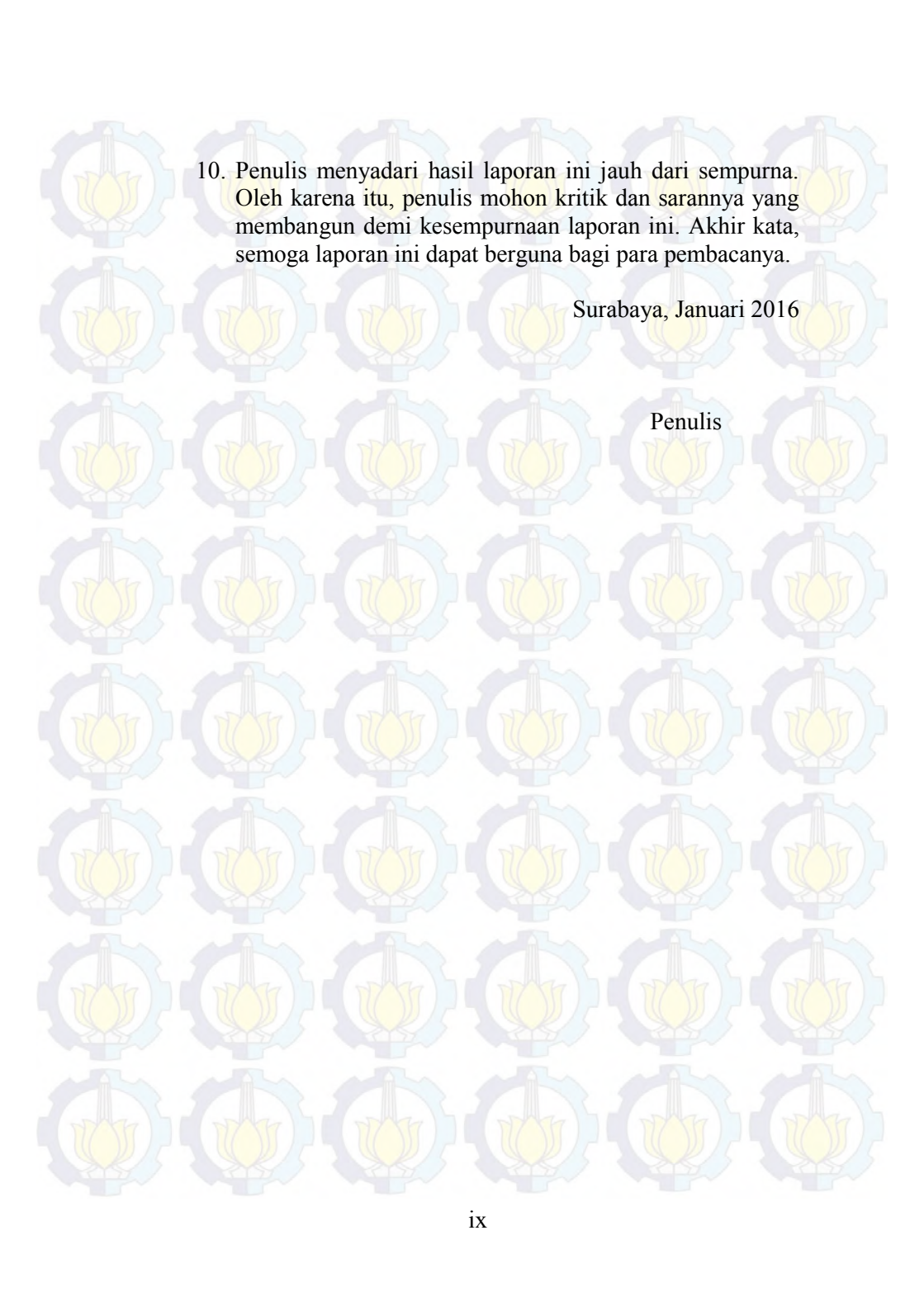


## KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puji dan syukur kehadirat Ida Sang Hyang Widhi Wasa, karena atas asung kerta warenugraha-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan dari penelitian tugas akhir ini. Dalam proses pembuatan laporan ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua penulis, Bapak I Nyoman Supartha, S.H. dan Renny Sujiyati atas doa, didikan dan motivasinya selama ini.
2. Saudara penulis, I Made Kharisma Agung Putra, I Nyoman Anugrah Dewata Agung Putra dan Ni Ketut Citra Sekar Ayu Rizkita Putri atas motivasinya selama ini.
3. Dosen Pembimbing Tugas Akhir, Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng atas arahan dan bimbingannya agar tugas akhir ini memiliki sebuah nilai kontribusi.
4. Dosen Wali, Indra Sidharta ST.,M.Sc. atas bimbingannya dalam menentukan arah karir dari penulis.
5. Rekan kerja Tugas Akhir, I Nyoman Ari Susastrawan, ST. yang selalu membantu dan memberikan dukungan dalam menyelesaikan tugas akhir.
6. Melisa Ayuningtyas yang telah memberikan kontribusi yang sangat berarti dan menjadi motivasi dalam penyelesaian tugas akhir.
7. Kepada teman-teman angkatan M-54
8. Kepada Keluarga Besar Kemeterian Sosial Masyarakat Badan Eksekutif Mahasiswa ITS yang telah memberikan dukungan dan menjadi motivasi dalam menyelesaikan tugas akhir.
9. Kepada semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu atas bantuannya kepada penulis dalam menyelesaikan kuliah S1 di Teknik Mesin ITS





10. Penulis menyadari hasil laporan ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mohon kritik dan sarannya yang membangun demi kesempurnaan laporan ini. Akhir kata, semoga laporan ini dapat berguna bagi para pembacanya.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xx
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 <i>Heat Recovery Steam Generator</i> .....	5
2.2 <i>Superheater</i> .....	6
2.3 <i>Fin</i> .....	6
2.4 Analisa Perpindahan Panas.....	8
2.4.1 Perpindahan Panas Konduksi pada Silinder ....	8
2.4.2 Perpindahan Panas Konveksi dengan Aliran Melewati Sisi Dalam Silinder.....	10
2.4.3 Performa <i>Fin</i> .....	11
2.4.3.1 Performa <i>Circular Fin</i> .....	12
2.5 Penelitian Terdahulu.....	15
2.5.1 Mi Sandar Mon (M.E).....	15
2.6 Pemodelan pada FLUENT.....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Tahapan Penelitian.....	23
3.2 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	24
3.3 Tahapan Permodelan dan Simulasi.....	25
3.3.1 <i>Pre Processing</i> .....	26
3.3.2 <i>Processing</i> .....	32
3.3.3 <i>Post-Processing</i> .....	35

3.4 Pengolahan Data .....	36
---------------------------	----

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Distribusi Temperatur dan Kecepatan Aliran pada <i>Fin</i> dan <i>Tube Superheater</i> .....	39
4.1.1 Analisa Kecepatan Aliran pada <i>Circular Finned-Tube Superheater</i> .....	40
4.1.2 Analisa Distribusi Temperatur dan Jarak pada <i>Circular Finned-Tube Superheater</i> .....	42
4.1.3 Analisa Kecepatan Lokal pada <i>Tube Superheater</i> .....	45
4.1.4 Analisa Distribusi Temperatur dan Jarak pada <i>Tube Superheater</i> .....	48
4.2 Analisa Distribusi temperatur pada <i>Circular-Finned Tube Superheater</i> .....	51
4.2.1 Analisa Distribusi Temperatur dengan Variasi Tebal <i>Fin</i> .....	51
4.2.2 Analisa Distribusi Temperatur dan Variasi Lebar <i>Fin</i> .....	55
4.2.3 Analisa Distribusi Temperatur dan Variasi Jenis Material <i>Fin</i> .....	59
4.3 Analisa Performa <i>Circular Finned-Tube Superheater</i> .....	63
4.4 Analisa Efektifitas dan Efisiensi Terhadap Variasi Tebal <i>Fin</i> .....	68
4.4.1 Analisa Efektifitas terhadap Variasi Tebal <i>Fin</i> .....	68
4.4.2 Analisa Efisiensi terhadap Variasi Tebal <i>Fin</i> .....	70
4.5 Analisa Efektifitas dan Efisiensi Terhadap Variasi Lebar <i>Fin</i> .....	71
4.5.1 Analisa Efektifitas terhadap Variasi Lebar <i>Fin</i> .....	71
4.5.2 Analisa Efisiensi terhadap Variasi Lebar <i>Fin</i> .....	73
4.6 Analisa Efektifitas dan Efisiensi <i>Fin</i> Terhadap Variasi Jenis Material .....	75
4.6.1 Analisa Efektifitas terhadap Jenis Material <i>Fin</i> .....	75
4.6.2 Analisa Efisiensi terhadap Jenis Material <i>Fin</i> .....	76
4.7 Analisa Pengaruh Radiasi Terhadap Distribusi Temperatur pada <i>Circular Finned-tube Superheater</i> ..	78



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

81

### 5.2 Saran

81

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Skema Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU).....	1
Gambar 1.2	Jenis <i>Finned Tube</i> pada <i>Heat Exchanger</i> .....	2
Gambar 2.1	<i>Heat Recovery Steam Generator</i> PT. Pembangkit Jawa Bali UP Gresik .....	5
Gambar 2.2	Desain <i>Superheater</i> pada PLTGU PT. Pembangkit Jawa Bali UP Gresik .....	6
Gambar 2.3	Fenomena Konveksi (a) Tanpa Menggunakan <i>Fin</i> (b) Menggunakan <i>Fin</i> .....	7
Gambar 2.4	Konfigurasi <i>Fin</i> (a) <i>Straight Fin of Uniform Cross Section</i> (b) <i>Straight Fin of Non-uniform Cross Section</i> (c) <i>Annular Fin</i> (d) <i>Pin Fin</i> .....	7
Gambar 2.5	Silinder dengan Kondisi Permukaan Terkena Konveksi .....	9
Gambar 2.6.	Kontrol Volume untuk Aliran Internal di Dalam Pipa .....	10
Gambar 2-7	Grafik Efisiensi pada <i>Circular Finned Tube</i> . ..	15
Gambar 2-8.	Pengaruh lebar <i>fin</i> terhadap performa <i>fin</i> untuk <i>tube</i> dengan susunan <i>staggered</i> dan <i>in line</i> ...	17
Gambar 2-9	Pengaruh ketebalan <i>fin</i> terhadap performa <i>fin</i> untuk <i>tube</i> dengan susunan <i>staggered</i> .....	18
Gambar 3-1.	Flowchart Penelitian.....	24
Gambar 3-2.	Simplifikasi Domain Permodelan .....	26
Gambar 3-3.	Geometri <i>Tube Superheater</i> .....	27
Gambar 3-4.	Geometri <i>Circular Fin Tube Superheater</i> ....	28
Gambar 3-5.	<i>Meshing</i> untuk <i>Tube Superheater</i> untuk Aliran 3D dengan Bentuk <i>Hexahedron-Map</i> ..	29
Gambar 3-6.	<i>Meshing</i> untuk <i>Circular Finned Tube Superheater</i> untuk Aliran 3D dengan Bentuk <i>Hexahedron-Map</i> .....	30
Gambar 3-7.	<i>Boundary Condition</i> untuk <i>Tube Superheater</i> ..	31
Gambar 3-6.	. <i>Boundary Condition</i> untuk <i>Circular Finned</i>	

	<i>Tube Superheater</i> .....	32
Gambar 4-1.	Kontur Distribusi Kecepatan pada <i>Circular Finned-Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math></i> ), $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm	40
Gambar 4-2.	Visualiasi Vektor Kecepatan pada <i>Circular Finned-Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math></i> ), $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm	42
Gambar 4-3.	Kontur Distribusi Temperatur pada <i>Circular Finned-Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math></i> ), $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm .....	43
Gambar 4-4.	Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada <i>Circular Finned-Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math></i> ), $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm.....	44
Gambar 4-5.	Kontur Distribusi Kecepatan pada <i>Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math></i> ), $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm .....	46
Gambar 4-6.	Visualiasi Vektor Kecepatan pada <i>Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math></i> ), $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm .....	47
Gambar 4-7.	Kontur Distribusi Temperatur pada <i>Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6</math></i> , $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm .....	48
Gambar 4-8.	Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada <i>Tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon Steel</i> ( <i>Carbon + Silicon, <math>Mn \leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math></i> ), $L = 58$ mm, dan $T = 1$ mm .....	49



Gambar 4-9	Kontur Distribusi Temperatur pada Tebal Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), $L = 58$ mm dan Variasi Tebal (a) 0.8 mm, (b) 1 mm, dan (c) 1.5 mm.....	51
Gambar 4-10	Kontur Distribusi Temperatur pada Circular Finned tube Superheater Jenis Material Carbon steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), $L = 58$ mm, dan variasi tebal (a) 0.8 mm, (b) 1 mm, dan (c) 1.5 mm.....	52
Gambar 4-11	Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), $L = 58$ mm, dengan Variasi Tebal (0.8, 1 dan 1.5 mm) ....	54
Gambar 4-12	Kontur Distribusi Temperatur pada Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), $T = 1$ mm dan lebar (a) 50.8 mm, (b) 58 mm, (c) 65 mm.....	55
Gambar 4-13	Kontur Distribusi Temperatur pada Circular Finned tube Superheater Jenis Material Carbon steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), $T = 1$ mm dan lebar (a) 50.8 mm, (b) 58 mm, (c) 65 mm.....	56
Gambar 4-14	Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), $L = 58$ mm, dengan Variasi Lebar Fin (50.8, 58 dan 65.2 mm).....	58
Gambar 4-15	Kontur Distribusi Temperatur pada Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1$	

	< Si $\leq$ 0.6%) dan (b) Carbon Steel (Plain Carbon, Mn $\leq$ 1%, Si $\leq$ 0.1%), L = 58 mm dan T = 1 mm .....	59
Gambar 4-16	Kontur Distribusi Temperatur pada Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, Mn $\leq$ 1%, 0.1 < Si $\leq$ 0.6%) dan (b) Carbon Steel (Plain Carbon, Mn $\leq$ 1%, Si $\leq$ 0.1%), L = 58 mm dan T = 1 mm .....	60
Gambar 4-17	Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada Circular Finned Tube, L = 58 mm, T = 1 mm dengan Variasi Jenis Material Fin.....	61
Gambar 4-18	Distribusi Temperatur oleh Konduksi dan Konveksi pada Fin.....	63
Gambar 4-19	Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, Mn $\leq$ 1%, 0.1 < Si $\leq$ 0.6%), L = 58 mm dan T = 1 mm.....	64
Gambar 4-20	Grafik Fungsi Logaritmik.....	65
Gambar 4-21	Grafik Efektifitas terhadap Tebal pada Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon, Mn $\leq$ 1%, 0.1 < Si $\leq$ 0.6%), L = 58 mm.....	68
Gambar 4-22	Grafik Efisiensi terhadap tebal pada Circular Finned tube Superheater Jenis Material Carbon steel (Carbon + Silicon, Mn $\leq$ 1%, 0.1 < Si $\leq$ 0.6%), L = 58 mm .....	70
Gambar 4-23	Grafik Efektifitas terhadap Lebar pada <i>Circular Finned tube Superheater</i> Jenis Material <i>Carbon steel (Carbon + Silicon, Mn <math>\leq</math> 1%, 0.1 &lt; Si <math>\leq</math> 0.6%), t = 1 mm</i> .....	72
Gambar 4-24	Grafik Efisiensi terhadap lebar pada Circular Finned tube Superheater Jenis Material Carbon steel (Carbon + Silicon, Mn $\leq$ 1%, 0.1 < Si	

	$\leq 0.6\%$ ), $T = 1\text{ mm}$ .....	74
Gambar 4-25	Grafik Efektifitas terhadap jenis material pada Circular Finned tube Superheater, $L= 58$ dan, $T = 1\text{ mm}$ .....	75
Gambar 4-26	Grafik Efisiensi terhadap jenis material pada Circular Finned tube Superheater, $L= 58$ dan, $T = 1\text{ mm}$ .....	77
Gambar 4-27	Kontur Distribusi Temperatur pada Circular Finned tube Superheater Jenis Material Carbon steel (Carbon + Silicon, $Mn \leq 1\%$ , $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), $L= 58\text{ mm}$ , dan $T=1\text{ mm}$ (a) Radiasi Diabaikan (b) Radiasi Tidak Diabaikan.....	78



## DAFTAR TABEL

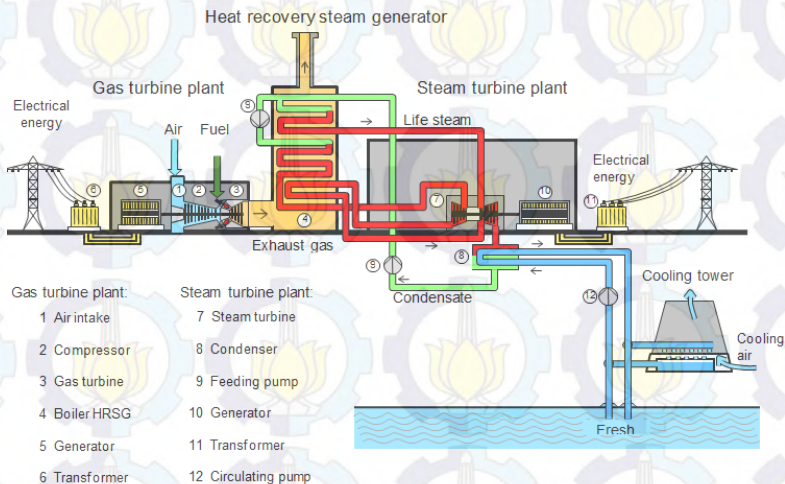
Tabel 2.1.	Parameter Penelitian untuk Susunan <i>Staggered</i>	15
Tabel 2.2.	Parameter Penelitian untuk Susunan <i>In-line</i> ....	16
Tabel 3.1.	Geometri <i>Circular Fin Tube Superheater</i> pada HSRG.....	28
Tabel 3.2.	<i>Boundary Condition Superheater</i> .....	31
Tabel 3.3.	<i>Properties</i> Fluida (Udara yang Dimodelkan Sebagai Gas Ideal) .....	34
Tabel 3.4.	<i>Properties</i> Fluida ( <i>Water Vapour</i> ).....	34
Tabel 3.5.	<i>Properties Carbon Steels (carbon + silicon, Mn <math>\leq 1\%</math>, <math>0.1 &lt; Si \leq 0.6\%</math>)</i> .....	34
Tabel 3.6.	<i>Properties Carbon Steels (plain carbon,, Mn <math>\leq 1\%</math>, <math>Si \leq 0.1\%</math>)</i> .....	34
Tabel 3.7.	Hasil Validasi <i>Tube</i> Tanpa Menggunakan <i>Fin</i>	36
Tabel 3.8.	Hasil Validasi <i>Circular Finned-Tube</i> L = 0.0508 m, T = 0,001 m.....	37
Tabel 3.9.	Hasil Validasi <i>Circular Finned-Tube</i> L = 0.0652 m, T = 0,001 m .....	37
Tabel 3.10.	Hasil Validasi <i>Circular Finned-Tube</i> L = 0.058 m, T = 0,001 m.....	37
Tabel 3.11.	Hasil Validasi <i>Circular Finned-Tube</i> L = 0.058 m, T = 0,0015 m.....	38
Tabel 3.12.	Hasil Validasi <i>Circular Finned-Tube</i> L = 0.058 m, T = 0,0008 m.....	38



## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap (PLTGU) merupakan pembangkit listrik dengan siklus ganda (*combined cycle*) gabungan antara Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTGU dibuat untuk meningkatkan hasil guna (efisiensi) bahan bakar yang dipakai pada unit turbin gas. Peningkatan efisiensi dilakukan dengan menggunakan *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG). HRSG adalah ketel uap atau *boiler* yang memanfaatkan energi panas sisa gas buang suatu unit turbin gas untuk memanaskan air dan mengubahnya menjadi uap, dan kemudian uap tersebut dipergunakan untuk menggerakkan turbin uap.



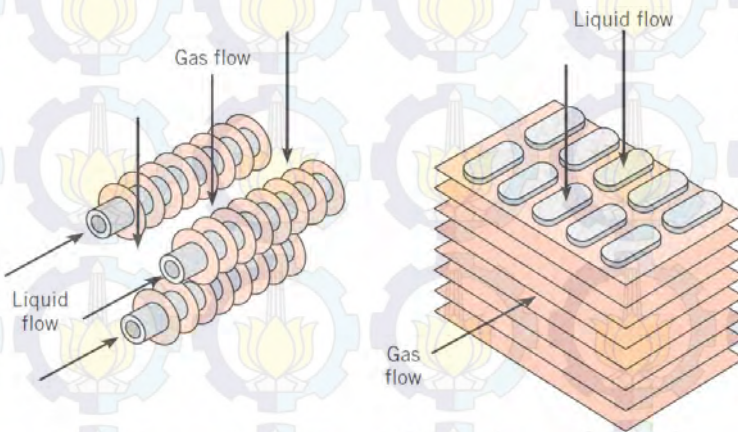
**Gambar 1.1** Skema Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

Pada PLTGU PT. Pembangkit Jawa Bali (PJB) UP Gresik dengan kapasitas 3 x 526 MW terdapat *heat exchanger*, alat penukar panas yang dapat digunakan untuk memanfaatkan atau



mengambil panas dari suatu fluida untuk dipindahkan ke fluida lain. Salah satu jenis *heat exchanger* adalah *superheater*, sebuah alat yang berfungsi menaikkan suhu uap jenuh menjadi uap kering (*superheated steam*). *Superheater* memiliki peran yang sangat penting, ketika performa dari *superheater* meningkat maka begitu pula dengan performa dari pembangkit. Hal tersebut dikarenakan semakin meningkatnya performa *superheater* maka kualitas *steam* yang dihasilkan akan semakin bagus sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin akan meningkat.

Untuk meningkatkan performa *superheater* perlu dilakukan penambahan *fin* pada susunan *tubes*. *Fin* dipasang untuk meningkatkan laju perpindahan panas dengan cara meningkatkan luasan permukaan yang dilewati oleh fluida kerja. Performa *fin* dipengaruhi oleh berbagai macam faktor yaitu material *fin*, ketebalan *fin*, lebar *fin*, dan jarak antar *fin*. Material *fin* yang digunakan pada *superheater* adalah material yang memiliki nilai konduktifitas tinggi, tahan terhadap temperatur tinggi, harga murah dan tidak korosif. Faktor pemilihan material *fin*, ketebalan *fin*, lebar *fin*, dan jarak antar *fin* menjadi penting dipelajari untuk meningkatkan unjuk kerja *superheater heat exchanger* dan sistem pembangkit secara keseluruhan.



**Gambar 1.2** Jenis *Finned Tube* pada *Heat Exchanger*

## 1.2 Rumusan Masalah

Perpindahan panas pada *superheater* sangat dipengaruhi oleh *tube* dan *fin*. Perpindahan panas yang terjadi pada *tube* dan *fin* sebagian besar terjadi secara konveksi dan konduksi. Perpindahan panas secara konduksi pada *fin* dipengaruhi oleh jenis material sedangkan secara konveksi dipengaruhi oleh ketebalan *fin*, lebar *fin*, dan jarak antar *fin*. *Fin* sangat berpengaruh dalam performa *superheater* dan sistem pembangkit secara keseluruhan. Maka dari itu perlu adanya penelitian yang mengkaji mengenai perbedaan distribusi temperatur pada *tube superheater* dengan menggunakan *fin* dan tanpa menggunakan *fin*. Selain itu perlu adanya penelitian yang mengkaji performa dari *fin* dengan memvariasikan jenis material *fin*, ketebalan *fin*, dan lebar *fin*. Proses analisis dilakukan dengan menggunakan software FLUENT.

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam analisis agar mengarah pada inti masalah sesungguhnya adalah :

1. Kondisi aliran pada *inlet* adalah *steady flow*, *incompressible*, *uniform* dan pada temperatur 735.15 K.
2. Faktor kekasaran pada permukaan diabaikan.
3. Perpindahan panas akibat radiasi diabaikan.
4. Energi bangkitan diabaikan.
5. Pemodelan *fin tube* pada *superheater* dibuat dengan menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6 dan disimulasikan dengan perangkat lunak FLUENT 6.3.26 dengan *domain* aliran 3 (tiga) dimensi.
6. Fluida kerja yang mengalir pada celah antar *fin* berupa fluida panas (udara yang dimodelkan sebagai gas ideal), propertinya konstan dan yang mengalir pada *tube* berupa fluida dingin (dimodelkan sebagai *vapour steam*).
7. Perpindahan panas terjadi secara konveksi dan konduksi.
8. Pada sisi *inlet* dikondisikan berupa *velocity inlet* dan *outflow* pada sisi *outlet*.



9. Pemodelan dan analisis *fin* menggunakan tipe *single fin*.
10. Material dari *tubes* adalah *carbon steels* (*carbon* + *silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ).

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui distribusi temperatur pada ketebalan *tube* 3D di bagian depan ( $\theta = 0^\circ$ ), atas, bawah dan belakang.
2. Mengetahui distribusi temperatur pada ketebalan *tube* dengan menggunakan *fin* 3D di bagian depan ( $\theta = 0^\circ$ ), atas, bawah dan belakang.
3. Mengetahui performa dari *fin* dengan memvariasikan jenis material *fin* menggunakan material *carbon steels* (*carbon* + *silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ), dan *carbon steels* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ).
4. Mengetahui performa dari *fin* dengan memvariasikan ketebalan *fin* pada ketebalan 0.8 mm, 1 mm dan 1.5 mm.
5. Mengetahui performa dari *fin* dengan memvariasikan lebar *fin* pada lebar 50.8 mm, 58 mm, dan 65.2 mm.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap semua pihak. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Meningkatkan pengetahuan mengenai perpindahan panas, khususnya pada *fin* dan *tube* dalam *superheater*.
2. Sebagai referensi dan literatur dalam pembuatan karya ilmiah atau jurnal.



## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

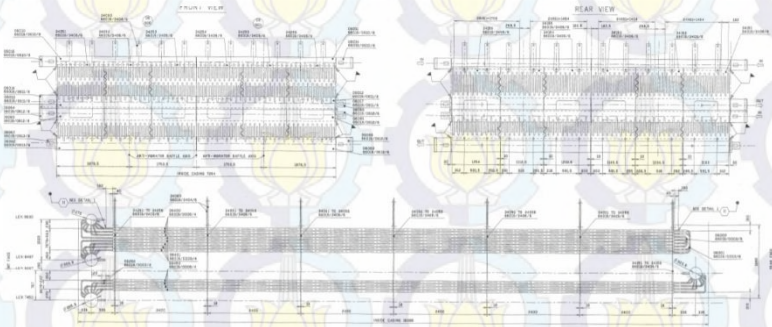
### 2.1 Heat Recovery Steam Generator

HRSG singkatan dari *Heat Recovery Steam Generator* merupakan bagian dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU), adalah ketel uap atau *boiler* yang memanfaatkan energi panas sisa gas buang suatu unit turbin gas untuk memanaskan air dan mengubahnya menjadi uap, dan kemudian uap tersebut dipergunakan untuk menggerakkan turbin uap. Putaran turbin tersebut akan memutar *generator* dan menghasilkan energi listrik. Proses merubah air menjadi uap dilakukan dengan memanaskan air dalam pipa-pipa menggunakan panas dari hasil gas sisa pembakaran turbin gas. Uap yang dihasilkan *boiler* adalah uap kering dengan tekanan dan temperatur tinggi. Jumlah uap yang diproduksi pada *boiler* bergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas yang dihasilkan pembakaran.



**Gambar 2.1** *Heat Recovery Steam Generator* PT. Pembangkit Jawa  
Bali UP Gresik

## 2.2 Superheater



**Gambar 2.2** Desain *Superheater* pada PLTGU PT. Pembangkit Jawa Bali UP Gresik

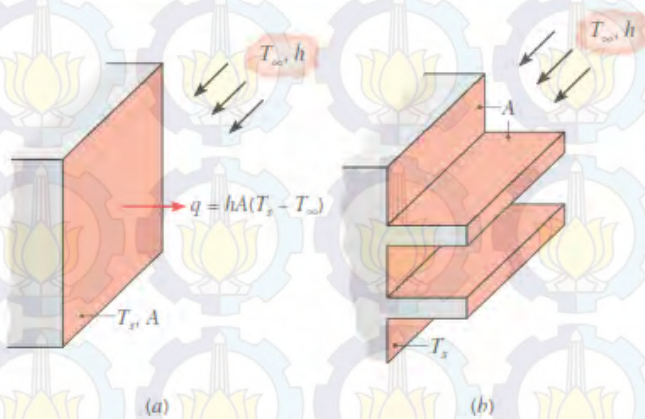
*Superheater* merupakan salah satu komponen penting di dalam *boiler*. Fungsi dari *superheater* adalah untuk menaikkan suhu uap jenuh menjadi uap kering (*superheated steam*). *Superheater* memiliki peran yang sangat penting, ketika performa dari *superheater* meningkat maka begitu pula dengan performa dari pembangkit. Hal tersebut dikarenakan semakin meningkatnya performa *superheater* maka kualitas *steam* yang dihasilkan akan semakin bagus sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin akan meningkat. Dari Gambar 2.2 dapat dilihat desain *superheater* pada PLTGU PT. Pembangkit Jawa Bali UP Gresik.

## 2.3 Fin

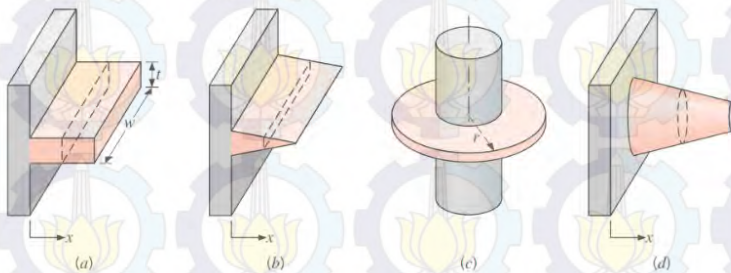
*Fin* merupakan sebuah perpanjangan luas permukaan, biasanya diaplikasikan untuk memperbesar perpindahan panas antara zat padat dan fluida yang saling berdampingan. Pada Gambar 2.3, jika  $T_s$  konstan, maka terdapat tiga cara untuk meningkatkan laju perpindahan panas. Koefisien konveksi  $h$  dapat ditingkatkan dengan meningkatkan kecepatan fluida atau mengurangi  $T_\infty$ . Biasanya untuk meningkatkan kecepatan fluida dalam aplikasinya kurang menguntungkan karena dibutuhkan biaya yang besar, sedangkan untuk mengurangi  $T_\infty$  dalam



praktiknya tidak dapat dilakukan. Cara ketiga adalah dengan meningkatkan luas permukaan yang dilewati oleh fluida dengan menggunakan *fin*. Konduktifitas termal dari material *fin* memiliki pengaruh yang besar terhadap laju perpindahan panas yang ditingkatkan. Secara ideal, material *fin* harus memiliki konduktifitas termal yang tinggi untuk meminimalkan variasi temperatur. Setiap *fin* memiliki konfigurasi tertentu bergantung pada geometri dari bidang yang dipasang *fin*. Konfigurasi *fin* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.3** Fenomena Konveksi (a) Tanpa Menggunakan *Fin* (b) Menggunakan *Fin*



**Gambar 2.4** Konfigurasi *Fin* (a) *Straight Fin of Uniform Cross Section* (b) *Straight Fin of Non-uniform Cross Section* (c) *Annular Fin* (d) *Pin Fin*



## 2.4 Analisa Perpindahan Panas

Dalam suatu *tube* yang melibatkan adanya perbedaan temperatur, akan terjadi perpindahan panas dari kedua kondisi tersebut. Ada dua jenis perpindahan panas utama yang terjadi yaitu perpindahan panas akibat aliran fluida di luar *tube* dan perpindahan panas akibat aliran fluida di dalam *tube*. Akibatnya, terjadi fenomena konduksi dan konveksi pada *tube*.

### 2.4.1 Perpindahan Panas Konduksi pada Silinder

Dalam keadaan *steady state*, silinder yang mempunyai diameter dalam dan luar dimana terdapat perbedaan temperatur pada fluida serta tidak ada energi bangkitan, dapat ditentukan oleh persamaan :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \dots \dots \dots (2.1)$$

K sebagai variabel tetap. Laju yang dikonduksikan melalui permukaan silinder pada benda solid diekspresikan sebagai berikut :

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k (2\pi rL) \frac{dT}{dr} \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana :

A = Luasan normal dari arah perpindahan panas ( $m^2$ )

$q_r$  = Perpindahan panas ke arah radial (W)

$\frac{dT}{dr}$  = Gradien temperatur ke arah radial (m/K)

Untuk menentukan distribusi temperatur pada silinder, dengan menyelesaikan persamaan 2.1. Asumsi k konstan, persamaan 2.1 diintegalkan 2 kali untuk mendapatkan persamaan umum.

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \dots \dots \dots (2.3)$$

Untuk menentukan konstanta  $C_1$  dan  $C_2$ , dengan mengikuti kondisi batas :

$$T(r_1) = T_{s,1} \text{ dan } T(r_2) = T_{s,2} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.4 ke persamaan 2.3 maka :

$$T_{s,1} = C_1 \ln r_1 \text{ dan } T_{s,2} = C_1 \ln r_2 + C_2 \dots \dots \dots (2.5)$$

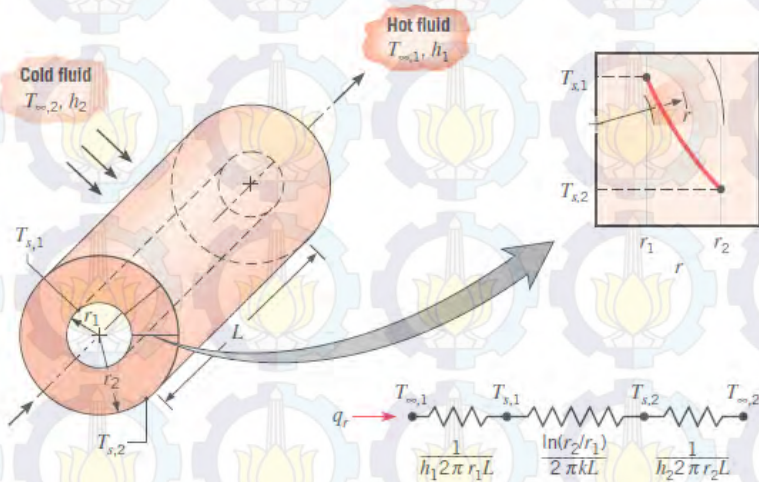
Dengan mendapatkan nilai  $C_1$  dan  $C_2$ , kemudian disubstitusikan ke persamaan 2.3, didapat :

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln \left( \frac{r_1}{r_2} \right)} \ln \left( \frac{r}{r_2} \right) + T_{s,2} \dots \dots \dots (2.6)$$

Jika distribusi temperatur pada persamaan 2.5 dimasukkan ke dalam *Fourier's Law*, maka laju perpindahan panas menjadi :

$$q_r = \frac{2\pi Lk (T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln \left( \frac{r_1}{r_2} \right)} \dots \dots \dots (2.7)$$

Distribusi temperatur untuk konduksi yang melewati silinder adalah logaritmik seperti Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Silinder dengan Kondisi Permukaan Terkena Konveksi

### 2.4.2 Perpindahan Panas Konveksi dengan Aliran Melewati Sisi Dalam Silinder

Untuk aliran *steady* dan *incompressible uniform* melewati luasan pada pipa,  $\dot{m}$  dan  $u$  konstan bergantung  $x$ . Dimana  $A_c = \frac{\pi D^2}{4}$  maka *Reynold Number* :  $Re_D \frac{\dot{m}}{D}$ . *Mean* temperatur dapat didefinisikan dengan persamaan :

$$\dot{m} c_p T_m = \int \rho u c_p T dA_c, q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \dots \dots (2.8)$$

atau :

$$T_m = \frac{\int \rho u c_p T dA_c}{\dot{m} c_p} \dots \dots \dots (2.9)$$

Untuk *heat flux* :

$$q_s'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=0} = -k \frac{\partial T}{\partial y} |_{r=r_o} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dalam aplikasi kesetimbangan energi yang digunakan untuk menentukan bagaimana *mean* temperatur  $T_m(x)$  bervariasi dengan posisi sepanjang pipa dan total perpindahan panas, konveksi dihubungkan dengan perbedaan temperatur pada pipa-pipa *inlet* dan *outlet*.

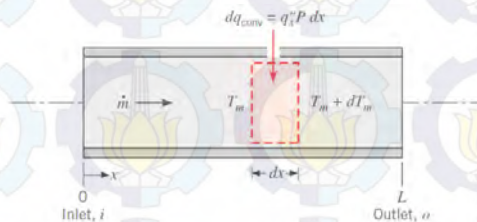
$$q_{conv} = \dot{m} c_p (T_{m,o} - T_{m,in}) \dots \dots \dots (2.11)$$

Seperti Gambar 2.6 dengan mengacu pada kontrol volume, laju perpindahan panas ditentukan :

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p [(T_m - dT_m) - T_m] \dots \dots \dots (2.12)$$

Atau :

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p dT_m \dots \dots \dots (2.13)$$



**Gambar 2.6** Kontrol Volume untuk Aliran Internal di Dalam Pipa



Untuk perpindahan panas pada elemen seperti pada Gambar 2.6 dimana  $dq_{conv} = q_s'' P dx$ , dimana  $P$  adalah parameter permukaan ( $P = \pi D$ ) untuk *circular tube* maka :

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s''}{m \cdot cp} = \frac{P}{m \cdot cp} h(T_s - T_m) \dots \dots \dots (2.14)$$

Persamaan 2.14 berlaku jika  $T_s > T_m$ . Untuk aliran laminar di dalam pipa dimana pada daerah yang berkembang penuh, koefisien konveksi memenuhi persamaan :

$$h = \frac{48}{11} \left( \frac{k}{D} \right) \text{ atau } Nu_D = \frac{hD}{k} = 4.36$$

dimana  $q_s = \text{konstan}$

sedangkan untuk temperatur permukaan yang konstan :

$$Nu_D = 3.66$$

dimana  $T_s = \text{konstan}$

Sedangkan untuk aliran turbulen di dalam pipa dimana nilai  $Re_D \geq 10.000$  maka menurut Colburn nilai  $Nu_D$  adalah :

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} P_r^{1/3} \dots \dots \dots (2.15)$$

Berbeda dengan Dittus-Boelter yang mendefinisikan nilai  $Nu_D$ , dimana :

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} P_r^n \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana  $n = 0.4$  untuk persamaan ( $T_s > T_m$ ) dan  $0.3$  untuk pendinginan ( $T_s < T_m$ ) dalam kondisi :

$$\left[ \begin{array}{l} 0.7 \leq P_r \leq 160 \\ Re_D \geq 10.000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right]$$

### 2.4.3 Performa Fin

*Fin* digunakan untuk meningkatkan perpindahan panas dari sebuah permukaan dengan cara meningkatkan area permukaan

efektif. Performa *fin* dapat diketahui dengan mengevaluasi efektifitas *fin* ( $\varepsilon_f$ ), didefinisikan sebagai rasio perpindahan panas pada *fin* dibandingkan dengan perpindahan panas tanpa menggunakan *fin*.

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_{c,b}\theta_b} \dots \dots \dots (2.17)$$

dimana :

$A_{c,b}$  = Luasan permukaan melintang tanpa menggunakan *fin* ( $m^2$ )

$q_f$  = Laju perpindahan panas pada *fin* (W)

$\theta_b$  = Perubahan temperatur ( $T_b - T_\infty$ ) (K)

$h$  = Koefisien konveksi ( $W\ m^{-2}\ K$ )

Pada dasarnya dalam mendesain *fin*, nilai dari ( $\varepsilon_f$ ) harus dibuat sebesar mungkin dan pada umumnya untuk mengevaluasi performa *fin* nilai ( $\varepsilon_f$ ) harus  $\geq 2$ . Performa *fin* juga dapat diketahui dengan mengevaluasi efisiensi dari *fin* ( $\eta_f$ ). Efisiensi *fin* dapat diketahui dengan membandingkan rasio perpindahan panas pada *fin* dibandingkan perpindahan panas maksimal yang dapat diterima oleh luas permukaan *fin*.

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{maks}} = \frac{q_f}{hA_f\theta_b} \dots \dots \dots (2.18)$$

dimana :

$A_f$  = Luasan permukaan dari *fin* ( $m^2$ )

$q_f$  = Laju perpindahan panas pada *fin* (W)

$\theta_b$  = Perubahan temperatur ( $T_b - T_\infty$ ) (K)

$h$  = Koefisien konveksi ( $W\ m^{-2}\ K$ )

#### **2.4.3.1 Performa Circular Fin**

Analisa perpindahan panas menjadi kompleks pada *fin* dengan tipe *non-uniform cross sectional area*. Untuk beberapa kasus, persamaan 2.19 tidak dapat digunakan dalam menghitung laju perpindahan panas pada *fin*.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left( \frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left( \frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \dots \dots \dots (2.19)$$

*Circular fin tube* dapat dilihat di Gambar 2.7 merupakan kasus yang spesial pada *fin* dengan *tipe non-uniform cross sectional area*, meskipun ketebalan *fin* *uniform* (*t* tidak bergantung pada *r*), *cross sectional area*,  $A_c = 2\pi r t$ , divariasikan dengan *r*. Dengan mengganti *r* menjadi *x* pada perumusan 2.19 dan luas permukaan dinyatakan dengan  $A_s = 2\pi(r^2 - r_1^2)$ , persamaan umum *fin* direduksi menjadi :

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dx} - \frac{2h}{kt} (T - T_\infty) = 0$$

atau, dengan  $m^2 = 2h/kt$  dan  $\Theta = T \pm T_\infty$ .

$$\frac{d^2 \Theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Theta}{dr} - m^2 \Theta = 0$$

Persamaan di atas merupakan persamaan Bessel yang telah dimodifikasi dari orde nol, persamaan umumnya adalah :

$$\theta(r) = C_1 I_0(mr) + C_2 K_0(mr)$$

Dimana  $I_0$  dan  $K_0$  dimodifikasi, *zero-order Bessel Function* berturut-turut dari orde pertama dan kedua. Jika temperatur pada bidang dari *fin* dideskripsikan dengan  $\theta(r_1 = \theta_b)$  dan diasumsikan adiabatik,  $d\theta/dr|_{r_2} = 0$ ,  $C_1$  dan  $C_2$  bisa dievaluasi dengan persamaan :

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{I_0(mr)K_1(mr_2) + K_0(mr)I_1(mr_2)}{I_0(mr_1)K_1(mr_2) + K_0(mr_1)I_1(mr_2)}$$

Dimana  $I_1(mr) = d[I_0(mr)]/d(mr)$  dan  $K_1(mr) = \pm d[K_0(mr)]/d(mr)$  merupakan modifikasi dari orde pertama fungsi Bessel. Fungsi Bessel dapat dilihat pada lampiran.

Dengan persamaan laju perpindahan panas pada *fin* adalah seperti persamaan di bawah ini :



$$q_f = -kA_{c,b} \frac{dT}{dr} \Big|_r = -k(2\pi r_1 t) \frac{d\theta}{dr} \Big|_r$$

Maka didapatkan persamaan :

$$q_f = 2\pi k r_1 t \theta_b m \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_2) - I_1(mr_1)K_1(mr_2)}{K_0(mr_1)I_1(mr_2) - I_0(mr_1)K_1(mr_2)} \dots (2.20)$$

Dari persamaan 2.20 maka efisiensi dari *fin* adalah :

$$\eta_f = \frac{q_f}{h2\pi(r_2^2 - r_1^2)\theta_b}$$

$$\eta_f = \frac{2r_1}{m(r_2^2 - r_1^2)} \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_2) - I_1(mr_1)K_1(mr_2)}{K_0(mr_1)I_1(mr_2) - I_0(mr_1)K_1(mr_2)} \dots (2.21)$$

$$m = \sqrt{\left(\frac{2h}{Kb}\right)} \dots (2.22)$$

dimana :

k = Konduktivitas material *fin* (W/m.K)

b = Tebal *fin* (m)

h = Koefisien konveksi (W m<sup>2</sup>.K)

Perumusan tersebut dapat diaplikasikan untuk *fin* dengan konveksi pada ujung *fin* yang aktif, jika radius  $r_2$  diganti radius yang sesuai dengan persamaan  $r_{2e} = r_2 + (t/2)$ . Hasilnya dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Gambar 2.7. Perumusan efisiensi pada *circular fin tubes* dapat dilihat pada Gambar 2.8. Untuk mendapatkan efektifitas dari *fin* dapat menggunakan persamaan 2.23 :

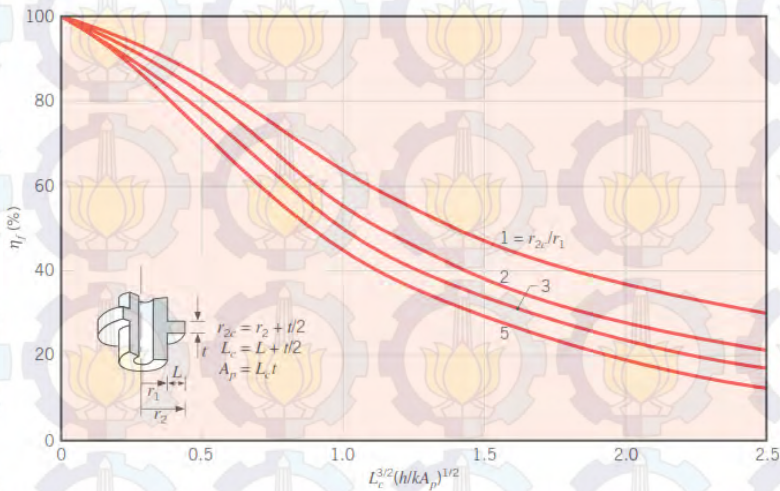
$$\varepsilon_f = \frac{1 - (1 - \eta_f)A_f}{A_t} \dots (2.23)$$

dimana :

A<sub>f</sub> = Luasan permukaan dari *fin* (m<sup>2</sup>)

A<sub>t</sub> = Luasan permukaan dari *tube* (m<sup>2</sup>)

$\eta_f$  = Efisiensi *fin* (%)



**Gambar 2.7** Grafik Efisiensi pada *Circular Finned Tube*

## 2.5 Penelitian Terdahulu

### 2.5.1 Mi Sandar Mon (M.E) (2003)

Penelitian dengan judul “*Numerical Investigation of Air-Side Heat Transfer and Pressure Drop in Circular Finned-Tube Heat Exchangers*” bertujuan untuk memahami distribusi lokal dan rata-rata perpindahan panas dan penurunan tekanan pada *circular finned-tube heat exchanger*. Pada penelitian tersebut investigasi dilakukan pada *tube* dengan susunan *staggered* dan *in-line*, nilai *Reynolds Numbers* dari  $5 \times 10^3 - 7 \times 10^4$ , menggunakan *software* FLUENT. Pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 dapat dilihat parameter-parameter yang divariasikan pada penelitian tersebut.

**Tabel 2.1** Parameter Penelitian untuk Susunan *Staggered*

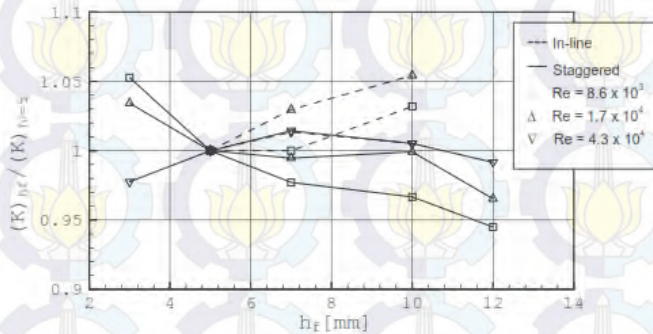
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
<i>Tube outside diameter, d</i>	24	24	24	24	24	24	24
<i>Fin diameter, d<sub>f</sub></i>	30	34	38	44	48	34	44
<i>Fin height, h<sub>f</sub></i>	3	5	7	10	12	5	5

Fin thickness, $\delta$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Fin spacing, $s$	2	2	2	2	2	1.6	4
Fin pitch, $s_f$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.1	4.5
Transverse tube pitch, $s_t$	36	40	45	52	57	40	52
Longitudinal tube pitch, $s_l$	31.1	35.3	39.4	45.7	49.8	35.3	35.3
Number of row, $n$	4	4	4	4	4	4	4
	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
Tube outside diameter, $d$	24	24	24	13.5	28	24	24
Fin diameter, $d_f$	44	34	34	23.5	38	34	34
Fin height, $h_f$	10	5	5	5	5	5	5
Fin thickness, $\delta$	0.5	0.3	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5
Fin spacing, $s$	0.7	2	2	2	2	2	2
Fin pitch, $s_f$	1.2	2.3	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5
Transverse tube pitch, $s_t$	40.8	40.8	40.8	28.3	45.6	48.4	64.8
Longitudinal tube pitch, $s_l$	45.7	35.3	35.3	24.5	39.4	41.9	56.1
Number of row, $n$	4	4	4	4	4	4	4

**Tabel 2.2** Parameter Penelitian untuk Susunan *In-line*

[illegible]

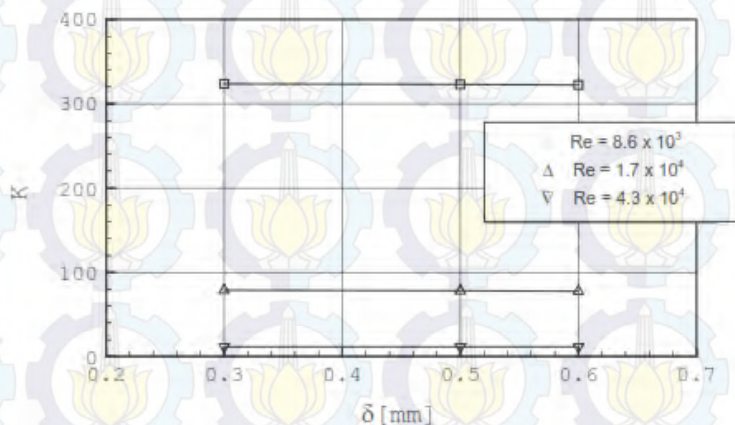




**Gambar 2.8** Pengaruh Lebar *Fin* Terhadap Performa *Fin* untuk *Tube* dengan Susunan *Staggered* dan *In-Line*

Pada Gambar 2.8 menunjukkan hasil analisis numerik pengaruh lebar *fin* terhadap performa *fin* secara keseluruhan. Lebar *fin* berpengaruh pada peningkatan *pressure drop* dan penurunan koefisien perpindahan panas baik pada susunan *tube staggered* dan *in-line*. Untuk nilai *Re* yang rendah dengan susunan *tube staggered* performa terbaik *fin* dengan lebar *fin* 3 mm, terjadi perbedaan *trend line* pada susunan *tube in-line* dimana semakin lebar *fin* berbanding lurus dengan performa *fin* untuk nilai *Re*  $8.6 \times 10^3$  dan  $1.7 \times 10^4$ . Bagaimanapun, untuk nilai *Re*  $4.3 \times 10^4$ , *trendline* berubah dan lebar *fin* optimal adalah 7 mm untuk susunan *tube staggered* dan *in-line*. Secara umum, menurunnya lebar *fin* memberikan efisiensi *fin* yang lebih baik, meningkatnya nilai koefisien perpindahan panas, dan menurunnya *pressure drop*.

Pada Gambar 2.9 menunjukkan hasil analisa numerik ketebalan *fin* terhadap performa *fin* secara keseluruhan. Perubahan ketebalan *fin* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap koefisien perpindahan panas dan *pressure drop*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan perubahan ketebalan *fin* tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap performa *fin* secara keseluruhan kecuali pada berat dan harga *fin*.



**Gambar 2.9** Pengaruh Ketebalan *Fin* Terhadap Performa *Fin* untuk *Tube* dengan Susunan *Staggered*

## 2.6 Pemodelan Pada FLUENT

*Computational Fluid Dynamic* (CFD) merupakan perangkat analisa dengan berdasarkan pada persamaan kontinuitas, momentum dan energi. Metode ini sering digunakan sebagai proses simulasi *thermofluid* untuk menyelesaikan berbagai permasalahan *engineering*. Dalam menggunakan metode ini, perlu adanya pemahaman mendalam tentang fenomena fluida dan perpindahan panas. Hal tersebut bertujuan agar hasil dari simulasi yang dilakukan cukup merepresentasikan kondisi secara nyata. Dalam melakukan proses simulasi ini, diperlukan tiga langkah dasar yaitu *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*.

Pada tahap *pre-processing*, langkah pertama yang dilakukan adalah pembuatan geometri model. Geometri model harus sesuai dengan dimensi serta parameter lain pada kondisi nyata. Langkah yang dilakukan selanjutnya adalah membagi-bagi *domain* pemodelan yang telah dibuat menjadi bagian-bagian kecil (*grid*). Pada umumnya, proses ini dinamakan *meshing*. Bagian-bagian kecil dari *domain* ini akan dilakukan perhitungan secara numerik oleh perangkat lunak dengan berdasarkan pada tiga



persamaan di atas. Kualitas dari hasil simulasi sangat dipengaruhi oleh kualitas *meshing*. Semakin besar jumlah *grid*, maka kualitas hasil simulasi akan semakin baik. Pada umumnya, jumlah *grid* yang dibuat harus optimal karena semakin banyak jumlah *grid*, maka semakin lama juga proses simulasi berlangsung dan diperlukan perangkat komputer dengan keandalan dan kualitas yang tinggi. Langkah yang dilakukan selanjutnya adalah pemberian kondisi batas (*boundary condition*) seperti *wall*, *velocity inlet*, *outflow*, *symmetry* dan lain-lain. Pemberian kondisi batas ini perlu dilakukan untuk mendefinisikan *domain* yang telah dibuat. Keseluruhan tahapan pada *pre-processing* tersebut dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GAMBIT.

Tahap selanjutnya adalah *processing* yang merupakan tahap simulasi pada *domain* pemodelan yang telah dibuat. Keseluruhan tahap ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak FLUENT. Pada tahap *processing*, langkah yang harus dilakukan adalah memberikan beberapa parameter yang digunakan untuk proses simulasi. Beberapa parameter tersebut yaitu :

1. Model 3D

Pada pemilihan model simulasi, terdapat beberapa pilihan pengaturan, salah satunya adalah model simulasi tiga dimensi dengan jenis *double precision*. Model tiga dimensi dipilih jika *domain* yang akan disimulasikan berbentuk tiga dimensi. Sedangkan jenis *double precision* dipilih jika *domain* yang akan disimulasikan memiliki geometri dan ukuran yang kompleks serta tidak memiliki gradasi dimensi yang sangat tinggi.

2. Solver

Pada pengaturan *solver*, terdapat pengaturan tentang jenis basis dari simulasi. Basis tekanan dapat dipilih jika fluida pada simulasi diasumsikan tidak mengalami perubahan *density*. Bila *density* fluida diasumsikan berubah saat proses simulasi, maka basis yang dipilih harus basis *density*.



### 3. *Turbulence Modelling*

Pada pengaturan *turbulence modelling*, terdapat pengaturan tentang pemodelan fluida yang mengalir secara turbulen. Jika bilangan Reynold fluida rendah, maka dapat dipilih - RNG. Selain itu, bila terdapat efek turbulensi aliran akibat *wall*, maka *Enhance Wall Treatment* dapat dipilih dengan mengaktifkan opsi *Pressure Gradient Effect* dan *Thermal Effect*.

### 4. *Energy Equation*

Pengaturan *energy equation* dapat diaktifkan bila simulasi yang dilakukan membutuhkan adanya perhitungan persamaan energi. Perhitungan persamaan energi perlu dilakukan pada simulasi yang memerlukan adanya analisis tentang distribusi perpindahan panas, *Nusselt Number*, dan lain-lain.

### 5. *Materials*

Pada pengaturan *Materials*, terdapat pengaturan tentang material fluida dan material solid yang digunakan pada saat simulasi berlangsung. Jenis dan *properties* material harus sesuai dengan kondisi operasi nyata agar simulasi yang dilakukan menghasilkan data-data yang akurat.

### 6. *Operating Condition*

Pada menu *operating condition*, terdapat pengaturan tentang tekanan yang ada di dalam sistem. Besarnya nilai tekanan tersebut harus sesuai dengan kondisi realita yang ada.

### 7. *Boundary Condition*

Pada menu *boundary condition*, terdapat pengaturan tentang pemberian nilai dari hasil pemberian kondisi batas pada tahap *pre-processing*.

### 8. *Control Monitoring and Residual Solution*

Pada menu *control monitoring and residual solution*, terdapat pengaturan tentang jenis perhitungan numerik seperti *first order*, *second order upwind* dan lain-lain. Selain itu, pada menu ini juga dilakukan pengaturan

tentang pembatasan nilai *error* yang diterima dari hasil proses perhitungan. Semakin kecil batas *error* yang diterima, maka hasil proses simulasi yang diperoleh juga akan semakin akurat.

9. *Initialize Condition*

Pada menu *initialize condition*, terdapat pengaturan tentang nilai awal dari proses perhitungan. Nilai awal dari proses perhitungan secara numerik ini dapat dilakukan dari berbagai tempat pada *domain*.

10. *Iteration*

Langkah terakhir proses pengaturan simulasi ini adalah *iteration*. Pada menu ini terdapat pengaturan tentang batasan jumlah iterasi yang dilakukan. Proses iterasi akan berhenti bila *error* hasil perhitungan telah memenuhi kriteria dari hasil pengaturan pada tahap *control monitoring and residual solution*.

Tahap selanjutnya yaitu *post-processing*. Pada tahap ini, dilakukan analisis dari hasil simulasi secara keseluruhan. Data yang dihasilkan dapat ditampilkan secara kualitatif dari kontur hasil simulasi, seperti kontur kecepatan, kontur temperatur, kontur tekanan dan lain-lain. Selain itu, hasil proses simulasi juga dapat ditampilkan secara kuantitatif, seperti nilai distribusi *Nusselt Number*, nilai koefisien perpindahan panas total, nilai kecepatan pada daerah dekat dinding dan lain-lain. Dari kedua jenis data ini, analisis yang dilakukan akan semakin akurat, sehingga karakteristik aliran dan perpindahan panas akan mudah dilakukan.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BAB 3 METODELOGI PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan analisis dan studi numerik mengenai pengaruh jenis material *fin* dan luas permukaan *fin* terhadap performa *circular finned tube superheater*, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, antara lain :

1. Studi Kasus

Permasalahan yang diangkat pada penelitian tugas akhir ini merupakan usaha untuk meningkatkan performa pada *circular finned tube superheater* di boiler HRSG PT. PJB UP Gresik.

2. Studi Literatur

Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan proses perpindahan panas yang terjadi pada *circular finned tube superheater* dengan variasi material dan luas permukaan *fin* yang digunakan, serta studi literatur mengenai simulasi perpindahan panas pada *circular finned tube superheater*. Studi literatur diperoleh dari *e-book*, buku-buku, jurnal dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik tugas akhir.

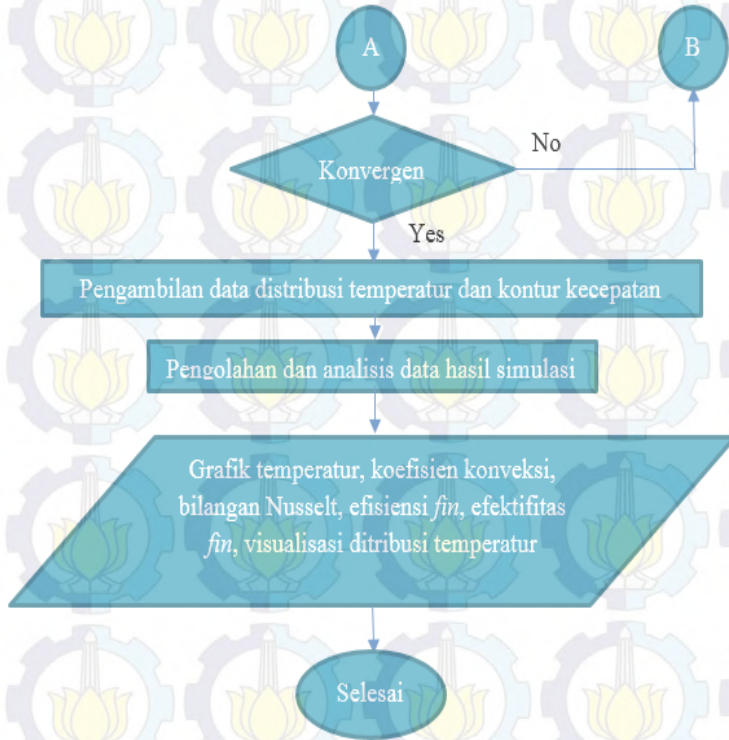
3. Pemodelan dan Simulasi

Proses pemodelan dan simulasi dilakukan secara bertahap. Tahapan pertama adalah *pre-processing* yaitu pembuatan geometri dan penentuan *domain* dari *fin tube heat exchanger* dengan menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6. Selanjutnya dilakukan *processing* yaitu proses simulasi dari *domain* kontrol volume yang telah dibuat dengan memasukkan *properties* serta data-data yang dibutuhkan. Selanjutnya dilakukan *post-processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa distribusi temperatur. *Processing* dan *post-processing* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.3.26.

4. Pengolahan dan Analisa Data Hasil Simulasi  
Setelah proses simulasi selesai, dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk kontur dan *pathline* untuk dianalisa secara kualitatif, dan juga diolah dalam bentuk grafik atau tabel sehingga dapat dianalisa secara kuantitatif. Dari kedua parameter tersebut didapat hasil berupa karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada *circular finned tube superheater*. Keseluruhan tahapan yang telah dilakukan dan hasil dari penelitian yang telah dibahas kemudian disusun dalam bentuk laporan yang sistematis.

### 3.2 Flowchart Penelitian





**Gambar 3.1** Flowchart Penelitian

### 3.3 Tahapan Pemodelan dan Simulasi

Pada penelitian ini akan dibandingkan hasil simulasi numerik pada *circular finned tube* dengan variasi material dan luas permukaan *fin*. Simulasi numerik adalah sebuah proses simulasi berbasis perhitungan yang dilakukan oleh sebuah perangkat lunak komputer dengan mendefinisikan parameter-parameter yang sesuai dengan *boundary conditions*, dilanjutkan proses iterasi atau pengulangan sampai tercapainya kovergensi untuk mendapatkan nilai pendekatan yang signifikan. Pada proses numerik terbagi menjadi 3 tahapan yakni *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*.

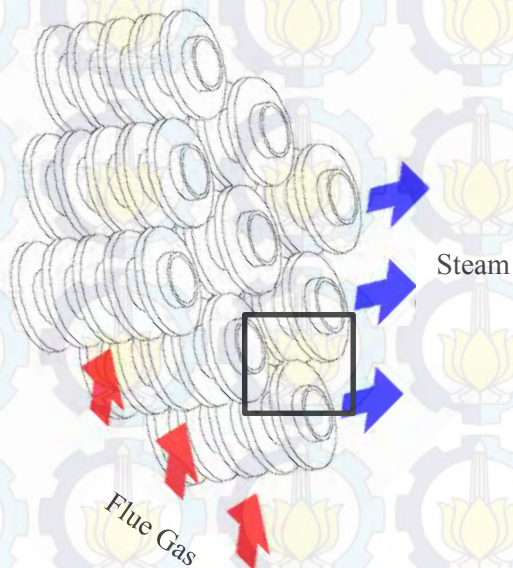


### 3.3.1 Pre-Processing

Pre-Processing adalah proses awal dari suatu simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Pada proses ini dilakukan pembuatan geometri dan menentukan *domain* dari *control volume* yang akan disimulasikan. Proses *pre-processing* seluruhnya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GAMBIT 2.4.6. Beberapa tahapan dari proses *pre-processing* antara lain adalah sebagai berikut :

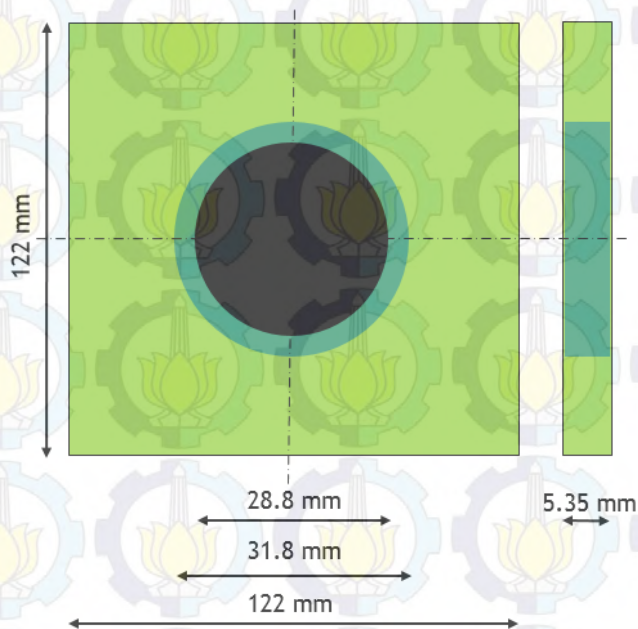
#### 1. Pembuatan Model

Model awal yang akan dibuat adalah bentuk susunan *superheater heat exchanger* yang kemudian akan ditentukan suatu kontrol volume yang dapat mewakili sistem secara menyeluruh seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.

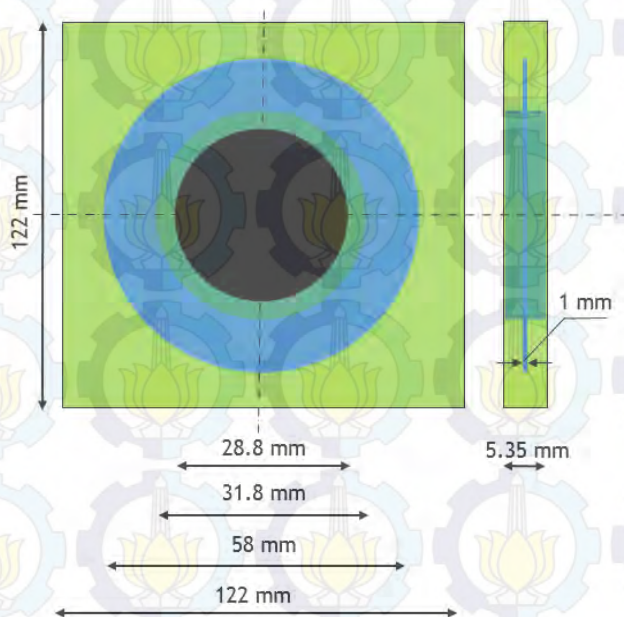


**Gambar 3.2** Simplifikasi Domain Permodelan

Kontrol volume dibuat untuk mensimplifikasi permasalahan dalam melakukan simulasi. *Superheater* tersusun 4 baris dengan setiap baris terdapat 58 buah *tube superheater*. Pemodelan menggunakan *single fin* untuk mengetahui performa salah satu bagian *circular finned tube superheater*. *Fin* yang dianalisa adalah pada baris pertama, karena kecepatan *fin* pada baris pertama dapat diketahui dari laju aliran massa pada *inlet duct* HRSG. Temperatur *flue gas* pada baris pertama *fin* diketahui melalui data CCR dari PT. PJB UP Gresik. Temperatur di dalam *tube* diasumsikan sama di setiap panjang *tube* sehingga dapat menggunakan data CCR dari PT. PJB UP Gresik. Rincian dimensi tercantum pada Tabel 3.1. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *circular finned tube superheater*.



**Gambar 3.3** Geometri *Tube Superheater*



**Gambar 3.4** Geometri *Circular Finned Tube Superheater*

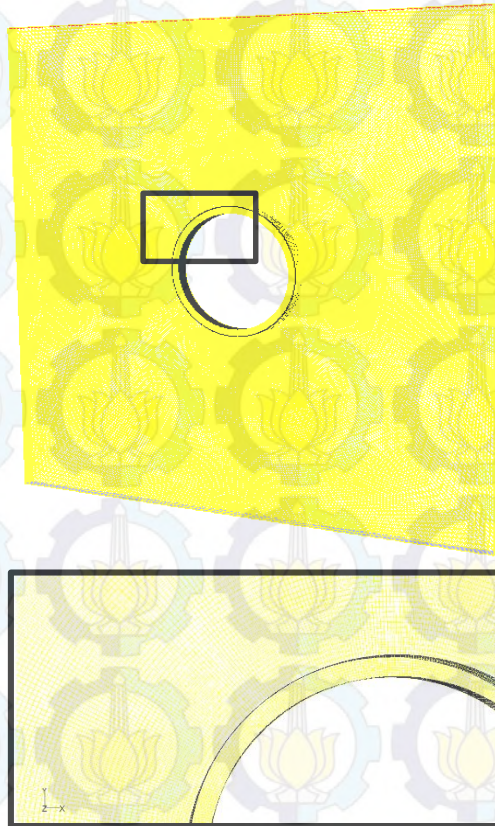
**Tabel 3.1** Geometri *Circular Finned Tube Superheater* pada HSRG

No	Dimensi	Nilai
<i>Superheater</i>		
1	Diameter Luar <i>Tube</i> (mm)	31.8 mm
2	Jarak Transversal ( $S_T/D$ )	3.836 mm
3	Jarak Longitudinal ( $S_L/D$ )	2.484 mm
4	Jumlah Baris <i>Tube</i>	8 baris
5	Ketebalan <i>Tube</i>	3 mm
6	Diameter <i>Fin</i>	58 mm
7	Ketebalan <i>Fin</i>	1 mm
8	Jumlah <i>Fin</i>	187 buah/meter

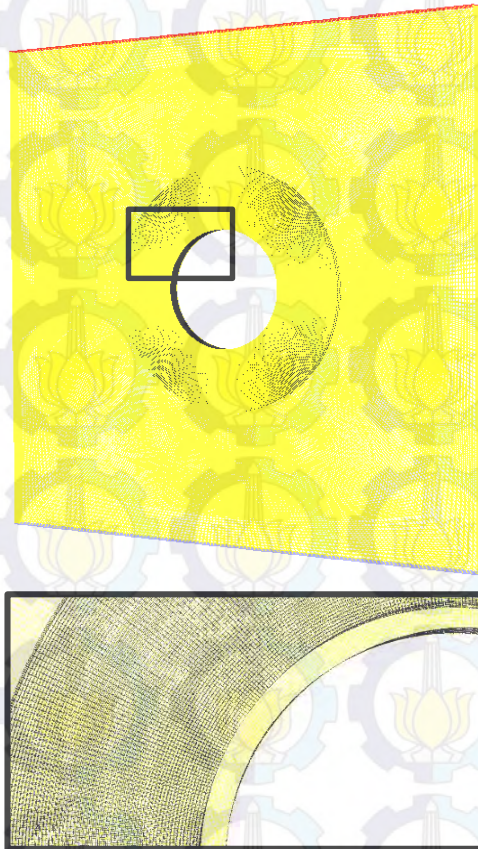


## 2. Pembuatan *Meshing*

Pembuatan *meshing* dilakukan berdasarkan dari geometri kontrol volume dimana ada aliran fluida didalamnya. *Mesh* yang digunakan adalah jenis *Hexahedron-map*. Fenomena dan karakteristik aliran yang akan dianalisa adalah aliran pada *control volume* yang melewati *circular finned tube* dari *superheater*. *Meshing* untuk pemodelan 3D dari *superheater* ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut.



**Gambar 3.5** *Meshing Tube Superheater* untuk Aliran 3D dengan Bentuk *Hexahedron-map*



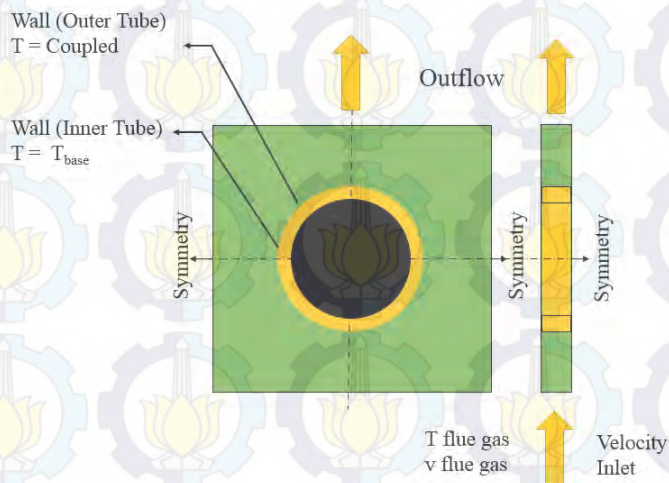
**Gambar 3.6** *Meshing Circular Finned Tube Superheater untuk Aliran 3D dengan Bentuk Hexahedron-map*

3. Penentuan *Boundary Condition* yang Digunakan  
Setelah pembuatan geometri dan proses *meshing*, dilakukan proses penentuan *boundary conditions*. Kondisi batas yang ditentukan untuk permodelan diinformasikan pada Tabel 3.2. Setelah dilakukan proses penentuan *conditions*, geometri model disimpan dan diekspor dalam bentuk *file* (\*.msh) agar dapat dibaca oleh perangkat lunak FLUENT.

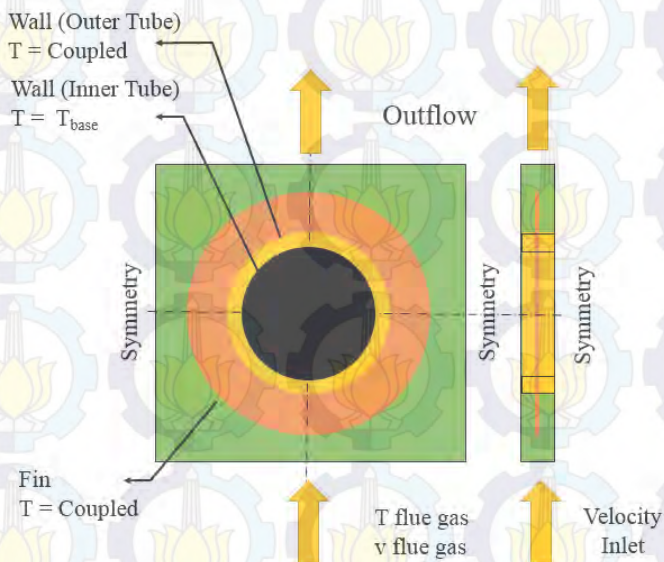


**Tabel 3.2** *Boundary Condition Superheater*

No.	Boundary Condition	Keterangan
1.	<i>Inlet</i>	Type : Velocity Inlet Kecepatan : 10.611 m/s Temperatur : 735.15 K
2.	<i>Outflow</i>	Type : <i>Outflow</i>
3.	<i>Inner Tube</i>	Type : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : 655.15 K
4.	<i>Outer Tube</i>	Type : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : <i>Coupled</i>
5.	<i>Fin</i>	Type : <i>Stationary Wall</i> Temperatur : <i>Coupled</i>
6.	Bidang kiri, kanan, depan dan belakang	Type : <i>Symmetry</i>

**Gambar 3.7** *Domain Pemodelan dan Boundary Condition Tube Superheater*





**Gambar 3.6** Domain Permodelan dan *Boundary Condition* Circular Finned Tube Superheater

### 3.3.2 Processing

Proses selanjutnya dari CFD adalah *processing*, proses ini dilakukan menggunakan *software* FLUENT 6.3.26. Tahapan pemodelan yang dilakukan dalam proses ini antara lain adalah mengatur *solver model*, *viscous model*, *materials*, *boundary conditions*, serta *initialize conditions*. Setelah seluruh pemodelan ditentukan, dilakukan proses iterasi untuk menyelesaikan proses simulasi. Berikut adalah penjelasan lebih lanjut mengenai langkah-langkah dalam *processing* :

#### 1. *Solver Model*

Pada simulasi tugas akhir digunakan penyelesaian 3 dimensi (3D) *double precision* dengan keakuratan ganda untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dalam menyelesaikan masalah. Untuk *solver* yang digunakan yaitu *pressured based* yang merupakan *solver* berbasis

tekanan dengan mengkondisikan waktu *steady*. Persamaan energi diaktifkan guna mendukung penyelesaian *heat-transfer* maupun efek kompresibilitas aliran terhadap perubahan tekanan dan temperatur. *Turbulence modelling* yang digunakan adalah k-e RNG (*Renormalization Group*) karena model ini mendukung efek turbulensi dan model diferensial viskositas untuk menghitung efek bilangan Reynold yang rendah serta model ini telah digunakan dalam dunia industri. Untuk mendukung keakuratan hasil iterasi pada daerah di dekat dinding. Diaktifkan menu *enhanced wall treatment* dengan memilih opsi *pressure gradient effect* dan *thermal effect*.

## 2. Material

Material yang digunakan dalam proses simulasi ini ada tiga yaitu fluida kerja yang mengalir eksternal melewati *tube*, fluida kerja yang mengalir di dalam *tube* dan material *tube*. Fluida kerja yang mengalir eksternal melewati *tube* dimodelkan sebagai gas ideal dengan temperatur 735.15 K, fluida kerja yang mengalir di dalam *tube* dimodelkan sebagai *water vapour* dengan temperatur *infinite* 655.15 K, material *tube* adalah *carbon steels* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ), material fin adalah *carbon steels* (*carbon + silicon + manganese*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ) dan *carbon steels* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ). *Properties* fluida diperoleh dari Tabel A.4. *Properties carbon steels* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ) dan *carbon steels* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) dapat dilihat dari Tabel A.1 pada buku berjudul "*Fundamental Heat and Mass Transfer Sixth Edition*" karya Incropera, dkk. (2002). *Properties* gas ideal ditabelkan pada Tabel 3.3, *properties water vapour* ditabelkan pada Tabel 3.4, dan *properties carbon steels* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ) dan *carbon steels* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) ditabelkan pada Tabel 3.5 dan 3.6



**Tabel 3.3** *Properties Fluida (Udara yang Dimodelkan Sebagai Gas Ideal)*

<b>Temperatur Inlet (K)</b>	<b>735.15 K</b>
<i>Density (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	0.474
<i>Specific Heat (Cp) (KJ/kg.K)</i>	1.083
<i>Thermal Conductivity (W/m.K)</i>	$5.415 \times 10^{-2}$
<i>Absolut Viscosity (<math>\mu</math>) (Kg/m.s)</i>	$3,499 \times 10^{-5}$
<i>Prandlt Number (Pr)</i>	0.699

**Tabel 3.4** *Properties Fluida (Water Vapour)*

<b>Temperatur Inlet (K)</b>	<b>655.15 K</b>
<i>Density(Kg/m<sup>3</sup>)</i>	0.335
<i>Specific Heat (Cp) (KJ/kg.K)</i>	2.058
<i>Thermal Conductivity (W/m.K)</i>	$4.682 \times 10^{-2}$
<i>Absolut Viscosity (<math>\mu</math>) (Kg/m.s)</i>	$2.265 \times 10^{-5}$
<i>Prandlt Number (Pr)</i>	0.996

**Tabel 3.5** *Properties Carbon Steels (carbon + silicon, Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%)*

<b>Temperatur Carbon Steel (K)</b>	<b>300</b>
<i>Density (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	7817
<i>Specific Heat (Cp) (KJ/kg.K)</i>	0.446
<i>Thermal Conductivity (W/m.K)</i>	51.9

**Tabel 3.6** *Properties Carbon Steels (plain carbon, Mn ≤ 1%, Si ≤ 0.1%)*

<b>Temperatur Carbon Steell (K)</b>	<b>300</b>
<i>Density (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	7854
<i>Specific Heat (Cp) (KJ/kg.K)</i>	0.434
<i>Thermal Conductivity (W/m.K)</i>	60.5



### 3. *Operating Conditions*

*Operating conditions* digunakan untuk mengatur tekanan di dalam sistem yang disimulasikan. Dalam simulasi ini, tekanan operasional diatur pada tekanan 101.325 Pa (absolut). Gravitasi diatur 9.81 m/s<sup>2</sup>.

### 4. *Boundary Conditions*

Informasi variabel yang akan disimulasikan dimasukkan sebagai parameter nilai untuk setiap *boundary conditions*. Simulasi ini menggunakan kondisi batas pada Tabel 3.2.

### 5. *Control and Monitoring Solution*

*Solution control* yang digunakan untuk metode *pressure-velocity coupling* adalah SIMPLE dengan diskritasi *second order upwind* untuk seluruh parameter. Pada *monitoring solution* dilakukan pengaturan kriteria residual untuk seluruh parameter sebesar 10<sup>-5</sup>, kecuali energi sebesar 10<sup>-6</sup>.

### 6. *Initialize Condition*

*Initialize* merupakan nilai awal untuk setiap parameter sebelum dilakukan proses iterasi pada simulasi. Metode inisialisasi yang dilakukan adalah *standard initialize* untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions* pada sisi *inlet* udara.

### 7. *Iterations*

Setelah seluruh pengaturan dilakukan, proses simulasi dimulai dengan melakukan iterasi sejumlah 6000 iterasi hingga mencapai kriteria konvergensi. Kriteria konvergensi ditentukan berdasarkan *residual monitoring level* yang telah diatur sebelumnya.

## 3.3.3 *Post-Processing*

Dari hasil simulasi diperoleh data perpindahan panas visualisasi distribusi temperatur dan visualisasi distribusi kecepatan yang melewati *circular finned tubes*. Selain itu, diketahui besar koefisien konveksi pada *surface circular finned tubes*, yang selanjutnya diolah dengan perangkat lunak Microsoft Excel 2013 dan akan disajikan dalam bentuk grafik.

### 3.4 Pengolahan Data

Setelah dilakukan proses simulasi mulai dari tahap *pre-processing*, *processing*, hingga *post-processing* menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6 dan FLUENT 6.3.26, maka diperoleh data kuantitatif. Data tersebut kemudian disimpan ke dalam bentuk *excel workbook* dan selanjutnya diolah secara matematis menggunakan rumus seperti yang sudah dipaparkan dalam Bab 2. Adapun tahapan pengolahan data yang dilakukan adalah *grid independency* dan validasi. *Grid independency* dilakukan untuk memastikan *grid* yang telah independen terhadap kasus yang akan disimulasikan. Pada independensi *grid* ini, dilakukan pembagian jumlah *meshing* ke dalam 4 jenis.

Hasil yang didapat dari proses *grid independency* ditunjukkan pada Tabel 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 dan 3.13. Pada tabel tersebut terlihat variasi jumlah *mesh* yang digunakan, nilai *Nu Number Average*, *T average* dan *error* relatifnya. *Error* relatif dihitung berdasarkan persamaan berikut :

$$|(\text{nilai lama}-\text{nilai baru})/(\text{nilai lama})|$$

**Tabel 3.7** Hasil *Tube* Tanpa Menggunakan Fin

<i>Mesh</i>	<i>T average</i> (K)	<i>Error T</i> (%)	<i>Nusselt Number Average</i>	<i>Error Nu</i> (%)
A. 37.3670	733.28985		280.65841	
B. 404.085	733.28566	0.00057	280.57657	0.02916
<b>C. 694.330</b>	<b>733.13232</b>	<b>0.02091</b>	<b>314.10922</b>	<b>0.119513365</b>
D. 796.250	733.19787	0.00894	314.92273	0.2589895



**Tabel 3.8** Hasil *Circular Finned Tube*  $L = 0.0508$  m,  $T = 0.001$  m

<i>Mesh</i>	<i>T average (K)</i>	<i>Error T (%)</i>	<i>Nusselt Number Average</i>	<i>Error Nu (%)</i>
A. 812.448	726.71448		95.918709	
B. 889.824	726.8738	0.02192	97.86055	2,0244653
<b>C. 941.408</b>	<b>726.833669</b>	<b>0.00552</b>	<b>97.788994</b>	<b>0.0731204</b>
D. 1.031.680	726.81228	0.00294	97.75975	0.0299052

**Tabel 3.9** Hasil *Circular Finned Tube*  $L = 0.0652$  m,  $T = 0.001$  m

<i>Mesh</i>	<i>T average (K)</i>	<i>Error T (%)</i>	<i>Nusselt Number Average</i>	<i>Error Nu (%)</i>
A. 960.752	726.43534		59.54112	
B. 1.031.680	726.96357	0.07268	58.794384	1,2541517
C. 1.083.264	727.08817	0.01714	56.74049	3,4933507
<b>D. 1.167.088</b>	<b>727.08605</b>	<b>0.00029</b>	<b>56.752232</b>	<b>0.0206942</b>

**Tabel 3.10** Hasil *Circular Finned Tube*  $L = 0.058$  m,  $T = 0.001$  m

<i>Mesh</i>	<i>T average (K)</i>	<i>Error T (%)</i>	<i>Nusselt Number Average</i>	<i>Error Nu (%)</i>
A. 857.584	726.97715		73.401062	
B. 922.064	726.92665	0.00695	73.459419	0.0795043
C. 986.544	726.91765	0.00124	73.297539	0.2203666
<b>D. 1.070.368</b>	<b>726.92007</b>	<b>0.00033</b>	<b>73.346176</b>	<b>0.0663556</b>



**Tabel 3.11** Hasil *Circular Finned Tube*  $L = 0.058$  m,  $T = 0.0015$  m

<i>Mesh</i>	<i>T average</i> (K)	<i>Error T</i> (%)	<i>Nusselt Number Average</i>	<i>Error Nu</i> (%)
A. 979.476	725.85464		79.483232	
B. 1.055.488	725.74895	0.00456	79.508141	0.031201
<b>C. 1.097.524</b>	<b>725.74743</b>	<b>0.00021</b>	<b>79.496193</b>	<b>0.150274</b>
D. 1.201.312	725.78091	0.00461	79.618668	0.154064

**Tabel 3.12** Hasil *Circular Finned Tube*  $L = 0.058$  m,  $T = 0.0008$  m

<i>Mesh</i>	<i>T average</i> (K)	<i>Error T</i> (%)	<i>Nusselt Number Average</i>	<i>Error Nu</i> (%)
A. 992.992	727.31259		69.421567	
B. 1.062.432	727.16685	0.02003	69.071472	0.5043029
C. 1.111.040	727.17079	0.39400	69.14785	0.1105782
<b>D. 1.201.312</b>	<b>727.16583</b>	<b>0.00068</b>	<b>69.13559</b>	<b>0.0177301</b>

## BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

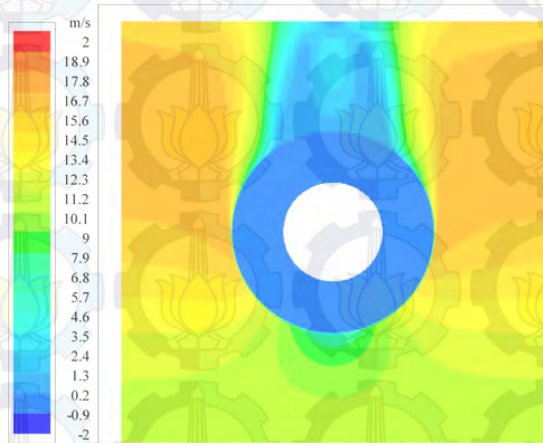
Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil simulasi numerik tentang pengaruh jenis material dan luas permukaan *fin* terhadap performa *circular finned tube superheater*. Simulasi numerik telah dilakukan dengan menggunakan *software* FLUENT 6.3.26 dan pembuatan geometri dan domain permodelan menggunakan *software* GAMBIT 2.4.6. Pengolahan data hasil simulasi CFD ditampilkan dalam bentuk kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif akan disajikan dalam bentuk grafik dan tabel, sedangkan data kualitatif akan disajikan dalam bentuk visualisasi kontur distribusi temperatur dan kecepatan. Data yang disajikan akan dianalisis berdasarkan pengaruh perbedaan variabel *independent* terhadap variabel *dependent*. Hal yang meliputi :

1. Pengaruh variasi lebar, tebal dan jenis material terhadap efisiensi *fin*.
2. Pengaruh variasi lebar, tebal dan jenis material terhadap efektifitas *fin*.
3. Pengaruh variasi lebar, tebal dan jenis material terhadap distribusi temperatur pada *fin*.
4. Pengaruh variasi lebar, tebal dan jenis material terhadap distribusi temperatur pada *tube*.

### 4.1 Analisis Distribusi Temperatur dan Kecepatan Aliran pada *Fin* dan *Tube Superheater*

Pemodelan dengan simulasi numerik menghasilkan data kualitatif dan kuantitatif. Analisis data kualitatif berupa visualisasi kontur distribusi perpindahan panas pada *fin* dan *tube*, selain itu analisis dilakukan pada visualisasi kontur kecepatan dari aliran dan visualisasi vektor kecepatan dari aliran. Analisis data kualitatif berupa grafik distribusi temperatur pada *fin* dan *tube* serta grafik kecepatan lokal pada *fin* dan *tube*.

#### 4.1.1 Analisa Kecepatan Aliran pada Circular Finned Tube Superheater



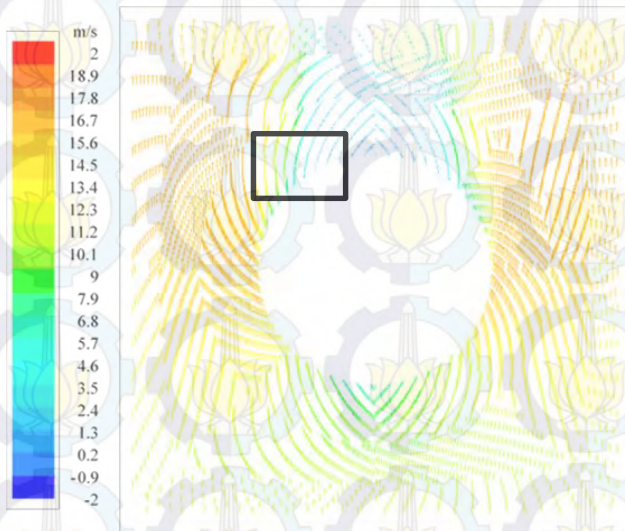
**Gambar 4.1** Kontur Distribusi Kecepatan pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$

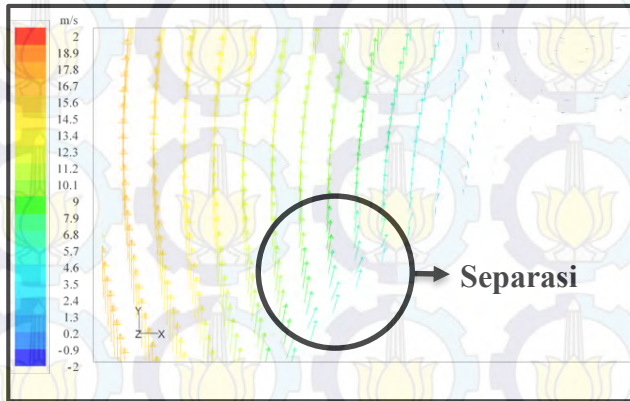
Fenomena aliran yang melewati *circular finned tube superheater* secara detail ditunjukkan pada tampilan kontur kecepatan aliran dan vektor kecepatan aliran pada *fin*. Kontur kecepatan aliran *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ), lebar *fin* 58 mm dan tebal *fin* 1 mm ditunjukkan pada Gambar 4.1

Distribusi kecepatan lokal pada model ditunjukkan oleh spektrum warna kontur aliran. Kontur dengan spektrum warna merah merupakan daerah yang memiliki nilai kecepatan yang tinggi, sedangkan spektrum berwarna biru menunjukkan nilai kecepatan yang rendah. Visualisasi kontur model *circular finned tube superheater* ini dianggap telah mewakili seluruh parameter yang memvariasikan jenis material, lebar dan tebal dari *fin*. Untuk seluruh model *circular finned tube superheater* mempunyai karakteristik kecepatan aliran yang hampir serupa namun memiliki nilai yang berbeda-beda.



Aliran yang menumbuk bagian ujung bawah *fin* mengalami perlambatan kecepatan yang terlihat dari warna pada kontur adalah biru muda. Seiring mengalirnya fluida di sepanjang sisi luar permukaan *fin* pada kontur dengan sudut  $30^\circ \leq \theta \leq 100^\circ$ , terjadi percepatan aliran yang ditunjukkan oleh distribusi kecepatan aliran berwarna hijau tua, hijau muda, kuning dan jingga. Pada sudut  $100^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  aliran kembali mengalami penurunan kecepatan lokal yang ditunjukkan oleh perubahan kontur distribusi kecepatan aliran berwarna kuning, hijau dan biru. Kecepatan aliran yang melewati bagian kiri dan kanan *fin* memiliki kontur yang serupa, hal ini diakibatkan oleh *fin* yang berbentuk lingkaran sehingga bagian kiri dan kanan *fin* adalah simetri. Terjadinya perlambatan kecepatan aliran pada ujung bawah *fin* karena aliran menumbuk pada titik yang memaksa aliran untuk mengalir melewati badan *fin* dan kedua sisi luas permukaan *fin*. Pada titik ini kecepatan aliran bernilai paling minimum dan tekanan bernilai maksimum. Kontur *fin* yang berupa silinder sirkuler memaksa aliran untuk mengalir mengikuti kontur luas permukaan dari *fin* dan berakibat pada meningkatnya nilai kecepatan lokal aliran.





**Gambar 4.2** Visualiasi Vektor Kecepatan pada *Circular Finned tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$ , dan  $T = 1 \text{ mm}$

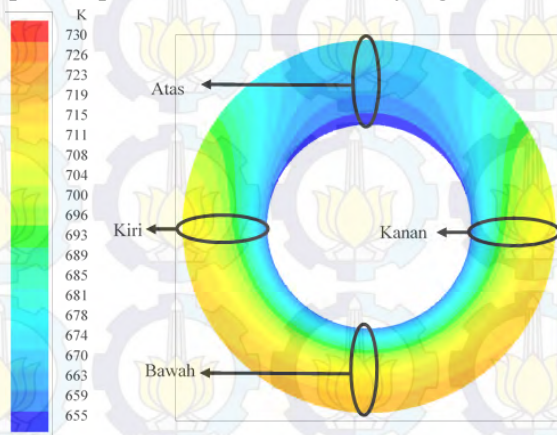
Gambar 4.2 merupakan visualiasi vektor kecepatan pada *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ), lebar = 58 mm dan tebal = 1 mm. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat pada sudut  $150^\circ$  baik di bagian kiri dan kanan *tube* terjadi separasi aliran. Separasi aliran merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. Untuk seluruh model *circular finned tube superheater* mempunyai karakteristik titik separasi yang hampir serupa namun memiliki nilai yang berbeda-beda. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat terbentuknya *wake*, yaitu daerah bertekanan rendah yang dibentuk oleh terpisahnya lapis batas bagian atas dan bagian bawah aliran. *Wake* terbentuk di bagian atas dari *fin* dan mengakibatkan terbentuknya *vorteks*. *Wake* pada bagian atas dari *fin* mengakibatkan rendahnya nilai kecepatan pada daerah tersebut.

#### **4.1.2 Analisa Distribusi Temperatur dan Jarak pada Circular Finned Tube Superheater**

Gambar 4.3 merupakan kontur distribusi temperatur *circular finned tube superheater* dengan jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ), lebar *fin* 58 mm dan tebal



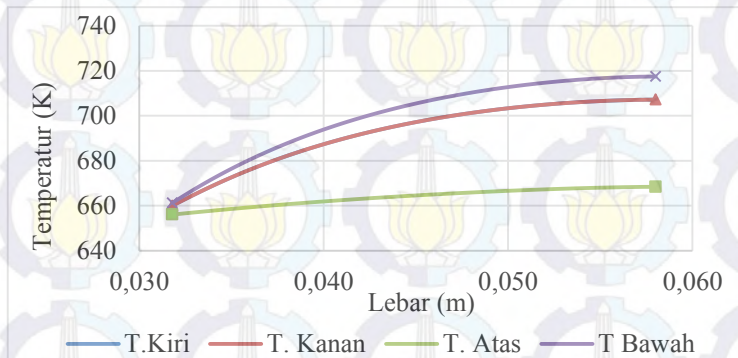
*fin* 1 mm. Warna merah menunjukkan nilai temperatur tertinggi dan warna biru tua menunjukkan nilai temperatur paling rendah. Terlihat bahwa temperatur tertinggi ditunjukkan oleh spektrum jingga terletak di bagian ujung bawah *fin* ( $l = 58$  mm) dan temperatur terendah ditunjukkan oleh spektrum biru tua terletak di bagian atas dari dekat permukaan *tube*. Distribusi temperatur terjadi dari bagian luar *fin* ( $l = 58$  mm) menuju bagian dalam *fin* ( $l = 31.8$  mm). Pada Gambar 4.3 untuk seluruh model *circular finned tube superheater* mempunyai karakteristik distribusi temperatur yang hampir serupa namun memiliki nilai yang berbeda-beda.



**Gambar 4.3** Kontur Distribusi Temperatur pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm, dan  $T = 1$  mm

Pada Gambar 4.4 menunjukkan grafik distribusi temperatur dan jarak pada *circular finned tube superheater* jenis material carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), lebar = 58 mm dan tebal = 1 mm. Distribusi temperatur dianalisa pada posisi atas, bawah, kiri dan kanan *fin*. Dapat dilihat dalam grafik pada setiap posisi, nilai temperatur tertinggi terletak di bagian paling luar dari *fin* ( $l = 58$  mm) dan akan menurun seiring dengan perubahan posisi menuju bagian paling luar dari *tube* ( $l = 31.8$  mm).





**Gambar 4.4** Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$

Pada grafik dapat dilihat posisi bagian bawah pada *fin* memiliki distribusi temperatur yang paling tinggi dibandingkan bagian kiri, kanan dan atas. Pada bagian bawah *fin*, temperatur permukaan luar ( $l = 58 \text{ mm}$ ) dan dalam *fin* ( $l = 31.8 \text{ mm}$ ) adalah  $717.421 \text{ K}$  dan  $661.337 \text{ K}$ . Pada bagian atas, temperatur permukaan luar ( $l = 58 \text{ mm}$ ) dan dalam *fin* ( $l = 31.8 \text{ mm}$ ) adalah  $681.5 \text{ K}$  dan  $667.5 \text{ K}$ . Pada bagian kiri dan kanan, temperatur permukaan luar ( $l = 58 \text{ mm}$ ) dan dalam *fin* ( $l = 31.8 \text{ mm}$ ) memiliki nilai yang sama yaitu  $707.158 \text{ K}$  dan  $660.057 \text{ K}$ .

Distribusi temperatur terjadi sesuai dengan konsep perpindahan panas, perpindahan panas ( $q$ ) terjadi dari area dengan temperatur tinggi menuju ke area dengan temperatur rendah. Pada studi ini, perpindahan panas terjadi dari *flue gas* yang mengalir melewati permukaan *fin*, lalu panas terdistribusi menuju *tube*. Sesuai dengan rumus perpindahan panas pada konduksi dimana distribusi temperatur pada silinder dipengaruhi oleh jari-jari silinder dan perbedaan temperatur di luar dan dalam silinder sesuai dengan rumus :

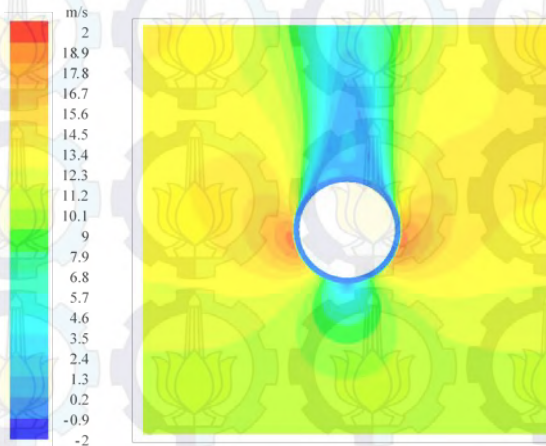
$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \times \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2}$$

Pada grafik dapat dilihat *trendline* distribusi temperatur adalah logaritmik, hal ini sesuai dengan rumus distribusi temperatur pada silinder sirkular. Temperatur paling tinggi terjadi di daerah bagian paling luar dari *fin* ( $l = 58 \text{ mm}$ ) dan akan menurun secara logaritmik seiring dengan perubahan posisi menuju bagian paling luar dari *tube* ( $l = 31.8 \text{ mm}$ ). Perbedaan distribusi temperatur terjadi karena panas yang diterima oleh *fin* diserap terlebih dahulu oleh bagian paling luar dari *fin* sehingga energi yang tersimpan dalam *flue gas* terus berkurang sampai ke bagian paling luar dari *tube*. Perbedaan nilai temperatur pada bagian bawah, atas, kiri dan kanan dari *fin* terjadi karena *flue gas* dialirkan dari posisi bawah menuju atas, sehingga panas pertama kali diterima oleh bagian bawah dari *fin* dan terus terdistribusi sampai ke bagian atas dari *fin*. Selain itu pada bagian atas *fin* distribusi kecepatan aliran *flue gas* paling rendah akibat aliran *flue gas* yang terhalang oleh *tube* dan mengakibatkan terbentuknya *wake*. *Wake* mengakibatkan perpindahan panas yang terjadi pada bagian atas *fin* paling rendah jika dibandingkan dengan bagian atas, kiri dan kanan.

#### **4.1.3 Analisa Kecepatan Lokal pada Tube Superheater**

Fenomena aliran yang melewati *circular tube superheater* secara detail ditunjukkan pada tampilan kontur kecepatan aliran, vektor kecepatan aliran dan grafik distribusi kecepatan lokal pada *tube*. Kontur kecepatan aliran untuk *tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon* + *silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ), lebar *fin* 58 mm, dan tebal *fin* 1 mm ditunjukkan pada Gambar 4.5. Distribusi kecepatan lokal pada model ditunjukkan oleh spektrum warna kontur aliran. Kontur dengan spektrum warna merah merupakan daerah yang memiliki nilai kecepatan yang tinggi, sedangkan spektrum berwarna biru menunjukkan nilai kecepatan yang rendah. Visualisasi kontur model *tube superheater* ini dianggap telah mewakili seluruh parameter yang memvariasikan jenis material, lebar dan tebal dari *fin*. Untuk seluruh model *tube superheater* mempunyai karakteristik kecepatan yang hampir serupa namun memiliki nilai yang berbeda-beda.

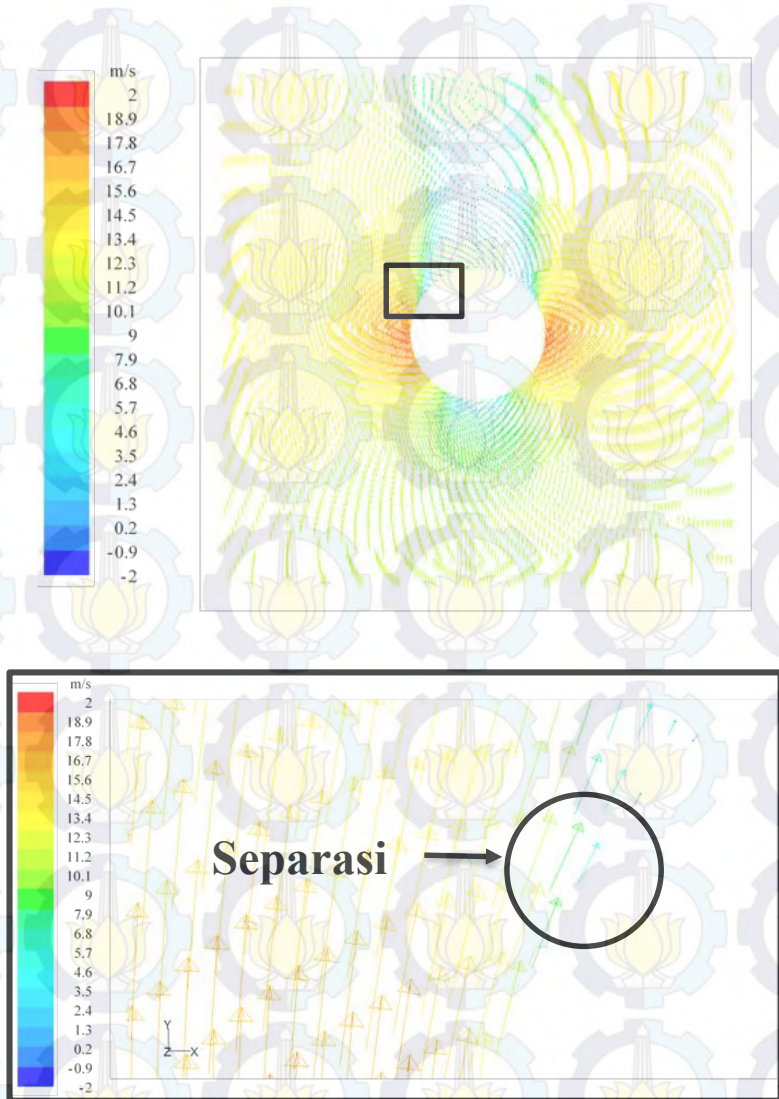




**Gambar 4.5** Kontur Distribusi Kecepatan pada *Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$* ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$

Aliran yang menumbuk ujung bawah *tube* mengalami perlambatan kecepatan yang terlihat dari warna pada kontur adalah biru tua. Seiring mengalirnya fluida di sepanjang sisi luar permukaan *tube* pada kontur dengan sudut  $30^\circ \leq \Theta \leq 100^\circ$ , terjadi percepatan aliran yang ditunjukkan oleh distribusi berwarna hijau, kuning, jingga, dan merah. Pada sudut  $100^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$  aliran kembali mengalami pengurangan kecepatan lokal yang ditunjukkan oleh distribusi aliran berwarna kuning, hijau dan biru. Kecepatan aliran yang melewati bagian kiri dan kanan *tube* memiliki kontur yang serupa, hal ini dikarenakan oleh *tube* yang berbentuk lingkaran sehingga bagian kiri dan kanan *tube* adalah simetri. Terjadinya perlambatan kecepatan aliran pada ujung bawah *tube* karena aliran menumbuk tepat pada titik stagnasi dan pada titik ini kecepatan aliran bernilai 0 m/s. Pada titik stagnasi kecepatan bernilai minimum dan tekanan bernilai maksimum. Kontur *tube* yang berupa silinder sirkuler memaksa aliran untuk mengalir mengikuti kontur dinding *tube* dan berakibat pada meningkatnya nilai kecepatan lokal aliran

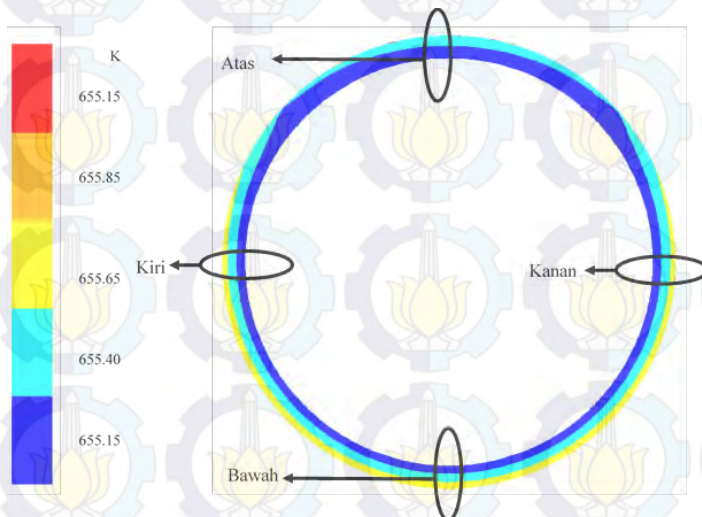




**Gambar 4.6** Visualisasi Vektor Kecepatan pada *Tube Superheater* Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$

Gambar 4.6 merupakan visualiasi vektor kecepatan pada *tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), lebar = 58 mm dan tebal = 1 mm. Pada Gambar 4.6 dapat dilihat pada sudut  $120^\circ$  baik di bagian kiri dan kanan *tube* terjadi separasi aliran. Separasi aliran merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. Untuk seluruh model *circular finned tube superheater* mempunyai karakteristik titik separasi yang hampir serupa namun memiliki nilai yang berbeda-beda. Pada Gambar 4.6 dapat dilihat terbentuknya *wake*, yaitu daerah bertekanan rendah yang dibentuk oleh terpisahnya lapis batas bagian atas dan bagian bawah aliran. *Wake* terbentuk di bagian atas dari *fin* dan mengakibatkan terbentuknya vorteks. *Wake* pada bagian atas dari *fin* mengakibatkan rendahnya nilai kecepatan pada daerah tersebut.

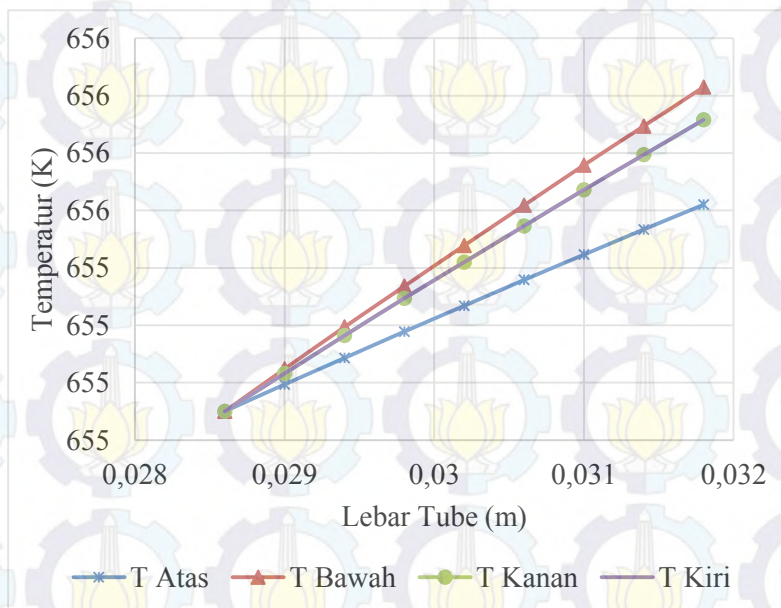
#### 4.1.4 Analisa Distribusi Temperatur dan Jarak pada Tube Superheater



**Gambar 4.7** Kontur Distribusi Temperatur pada *Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm dan  $T = 1$  mm



Gambar 4.7 merupakan kontur distribusi temperatur *tube superheater* dengan jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), lebar *fin* 58 mm dan tebal *fin* 1 mm. Warna merah menunjukkan nilai temperatur tertinggi dan warna biru tua menunjukkan nilai temperatur paling rendah. Terlihat bahwa temperatur tertinggi ditunjukkan oleh spektrum kuning dan temperatur terendah ditunjukkan oleh spektrum warna biru tua. Temperatur paling tinggi terletak di bagian ujung *tube* ( $l = 31.8$  mm) dan terus menurun ke bagian ujung dalam *tube* ( $l = 28.6$  mm). Pada Gambar 4.7 untuk seluruh model *tube superheater* mempunyai karakteristik distribusi temperatur yang hampir serupa namun memiliki nilai yang berbeda-beda.



**Gambar 4.8** Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada *Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm dan  $T = 1$  mm



Pada Gambar 4.8 menunjukkan grafik distribusi temperatur dan jarak pada *tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon* + *silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), lebar = 58 mm dan tebal = 1 mm. Distribusi temperatur dianalisis pada posisi atas, bawah, kiri dan kanan *tube*. Dapat dilihat dalam grafik pada setiap posisi, nilai temperatur tertinggi terletak di bagian paling luar dari *tube* ( $l = 31.8$  mm) dan akan menurun seiring dengan perubahan posisi menuju bagian paling dalam dari *tube* ( $l = 28.6$  mm). Pada grafik dapat dilihat posisi bagian bawah pada *tube* memiliki distribusi temperatur yang paling tinggi dibandingkan bagian kiri, kanan dan atas. Pada bagian bawah *tube*, temperatur permukaan luar ( $l = 31.8$  mm) dan dalam *fin* ( $l = 28.6$  mm) adalah 655.715 K dan 655.15 K. Pada bagian atas, temperatur permukaan luar ( $l = 31.8$  mm) dan dalam *tube* ( $l = 28.6$  mm) adalah 655.658 K dan 655.15 K. Pada bagian kiri dan kanan, temperatur permukaan luar ( $l = 31.8$  mm) dan dalam *tube* ( $l = 28.6$  mm) memiliki nilai yang sama yaitu 655.51 K dan 655.15 K.

Distribusi temperatur terjadi sesuai dengan konsep perpindahan panas, perpindahan panas ( $q$ ) terjadi dari area dengan temperatur tinggi menuju ke area dengan temperatur rendah. Pada studi ini perpindahan panas terjadi dari *flue gas* yang mengalir melewati permukaan *tube*, lalu panas terdistribusi menuju ke bagian dalam *tube*. Sesuai dengan rumus perpindahan panas pada konduksi dimana distribusi temperatur pada silinder dipengaruhi oleh jari-jari silinder dan perbedaan temperatur di luar dan dalam silinder sesuai dengan rumus :

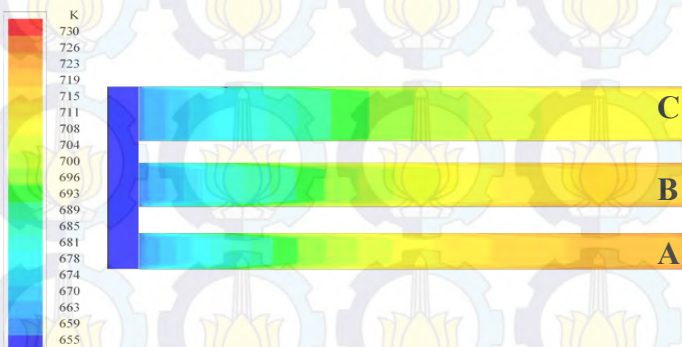
$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \times \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2}$$

Pada grafik dapat dilihat *trendline* distribusi temperatur adalah logaritmik, hal ini sesuai dengan rumus distribusi temperatur pada silinder sirkular. Temperatur paling tinggi terjadi di daerah bagian paling luar dari *tube* ( $l = 31.8$  mm) dan akan menurun secara logaritmik seiring dengan perubahan posisi menuju bagian paling dalam dari *tube* ( $l = 28.6$  mm). Perbedaan

distribusi temperatur terjadi karena panas yang diterima oleh *tube* diserap terlebih dahulu oleh bagian paling luar dari *tube* sehingga energi yang tersimpan dalam *flue gas* terus berkurang sampai ke bagian paling dalam dari *tube*. Perbedaan nilai temperatur pada bagian bawah, atas, kiri dan kanan dari *tube* terjadi karena *flue gas* dialirkan dari posisi bawah menuju atas, sehingga panas pertama kali diterima oleh bagian bawah dari *fin* lalu menuju bagian bawah dari *tube* dan terdistribusi menuju bagian atas dari *tube*. Setelah itu panas terdistribusi menuju bagian atas dari *fin*. Selain itu pada bagian atas *tube* distribusi kecepatan aliran *flue gas* paling rendah akibat aliran *flue gas* yang terhalang oleh *tube* dan mengakibatkan terbentuknya *wake*, yaitu daerah bertekanan rendah yang dibentuk oleh terpisahnya lapis batas bagian atas dan bawah aliran. *Wake* seakan-akan berperilaku sebagai penghalang aliran utama untuk menuntaskan alirannya di sepanjang kontur *tube*, sehingga perpindahan panas yang terjadi pada bagian atas *tube* paling rendah jika dibandingkan dengan bagian atas, kiri dan kanan.

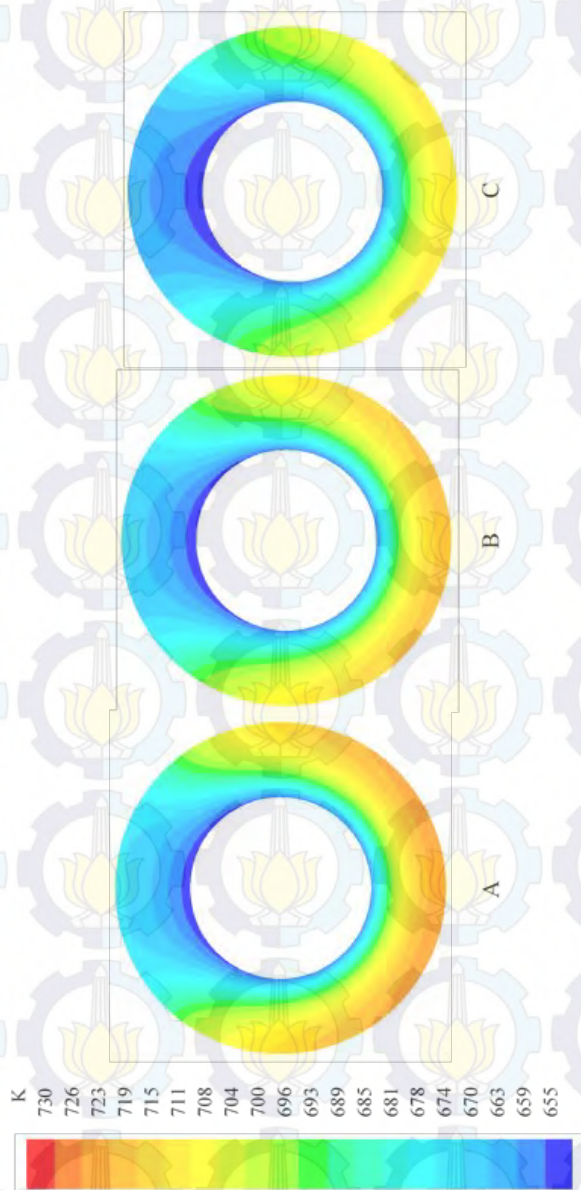
#### 4.2. Analisa Distribusi Temperatur pada Circular Finned Tube Superheater

##### 4.2.1 Analisa Distribusi Temperatur dengan Variasi Tebal Fin



**Gambar 4.9** Kontur Distribusi Temperatur pada Tebal Circular Finned Tube Superheater Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm dan Variasi Tebal (a) 0.8 mm, (b) 1 mm, dan (c) 1.5 mm





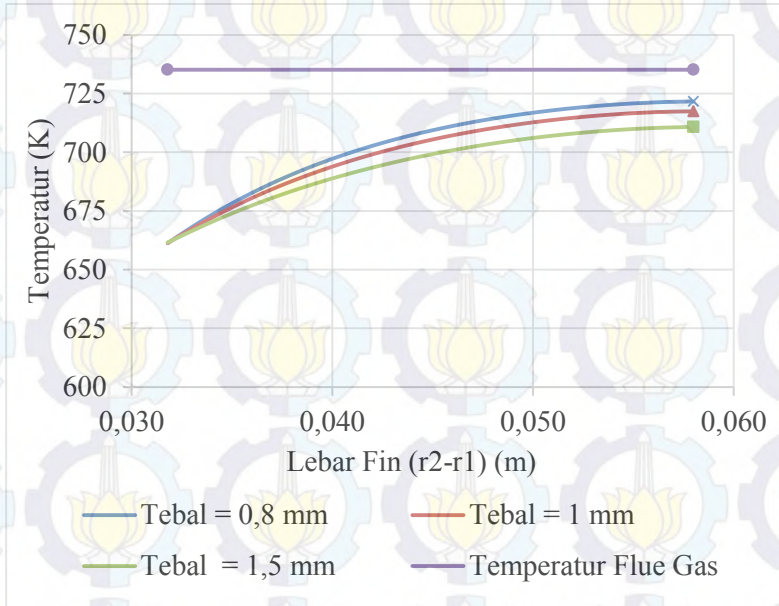
**Gambar 4.10** Kontur Distribusi Temperatur pada Circular *Finned tube* Superheater Jenis Material Carbon steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6$ ),  $L = 58$  mm, dan variasi tebal (a) 0.8 mm, (b) 1 mm, dan (c) 1.5 mm



Gambar 4.9 dan 4.10 merupakan kontur distribusi temperatur *circular finned tube superheater* dengan jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), lebar *fin* 58 mm dan tebal *fin* divariasikan pada Gambar 4.9 dan 4.10 (a) 0.8 mm, (b) 1 mm dan (c) 1.5 mm. Warna merah menunjukkan nilai temperatur tertinggi dan warna biru tua menunjukkan nilai temperatur paling rendah. Dari ketiga gambar dapat dilihat bahwa distribusi temperatur memiliki *pattern* yang hampir serupa tetapi memiliki nilai temperatur yang berbeda. Nilai temperatur di bagian paling luar dari *fin* ( $l = 58$  mm) lebih tinggi dibandingkan bagian paling dalam dari *fin* ( $l = 31.8$  mm). Temperatur tertinggi terletak di bagian ujung bawah dari *fin* ( $l = 58$  mm) dan temperatur terendah terletak di bagian atas dari *fin* ( $l = 31.8$ ). Pada kontur distribusi temperatur dapat dilihat bahwa temperatur paling tinggi dimiliki oleh *fin* dengan variasi tebal 0.8 mm dengan warna orange tua, lalu variasi tebal 1 mm dengan warna kontur distribusi temperatur orange dan variasi tebal 1.5 mm dengan warna kontur distribusi temperatur orange muda. Temperatur terendah tidak dapat dianalisa melalui kontur distribusi temperatur karena untuk ketiga jenis *fin* memiliki kontur temperatur terendah dengan warna biru tua.

Gambar 4.11 merupakan grafik distribusi temperatur pada *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm, dengan variasi tebal (0.8, 1 dan 1.5 mm). Distribusi temperatur diambil pada satu garis yang dianggap mewakili distribusi temperatur keseluruhan pada bagian *fin*. Distribusi temperatur diambil di bagian bawah *fin*, ditarik garis lurus dari ujung dalam *fin* ( $l = 31.8$  mm) sampai ujung luar *fin* ( $l = 58$  mm). Pada Gambar 4.11 dapat dilihat untuk variasi tebal *fin* 0.8 mm, temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 721.603 K dan terus menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 661.337 K. Variasi tebal *fin* 1 mm, temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 717.421 K dan terus

menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 661.337 K. Varisasi tebal *fin* 1.5 mm, temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 710,996 K dan terus menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 661.614 K.



**Gambar 4.11** Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon, Mn ≤ 1%, 0.1 < Si ≤ 0.6%*),  $L = 58$  mm, dengan Variasi Tebal (0.8, 1 dan 1.5 mm)

Perbedaan distribusi temperatur pada silinder sirkular dipengaruhi beberapa parameter. Hal tersebut sesuai dengan rumus :

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$



Pada persamaan untuk mencari laju perpindahan panas pada silinder sirkular. Nilai laju perpindahan panas berbanding lurus dengan kenaikan tebal dari silinder, koefisien konduksi dan perbedaan temperatur antar kedua sisi silinder. Selain itu, berbanding terbalik dengan nilai logaritmik perbandingan jari-jari luar dan dalam silinder.

Sesuai dengan persamaan maka semakin tebal *fin* akan meningkatkan laju perpindahan panas pada *fin* namun besarnya tidak signifikan. Pada *fin* dengan variasi tebal, meningkatnya tebal akan berbanding lurus dengan peningkatan laju perpindahan panas dan berbanding terbalik dengan perubahan temperatur ( $T_{s,1} - T_{s,2}$ ) pada bagian paling luar *fin* hingga pada bagian paling dalam *fin* tidak berubah secara signifikan, hal tersebut berbanding lurus dengan temperatur rata-rata pada luas permukaan *fin*.

#### 4.2.2 Analisa Distribusi Temperatur dan Variasi Lebar *Fin*



**Gambar 4.12** Kontur Distribusi Temperatur pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $T = 1$  mm dan lebar (a) 50.8 mm, (b) 58 mm, (c) 65 mm





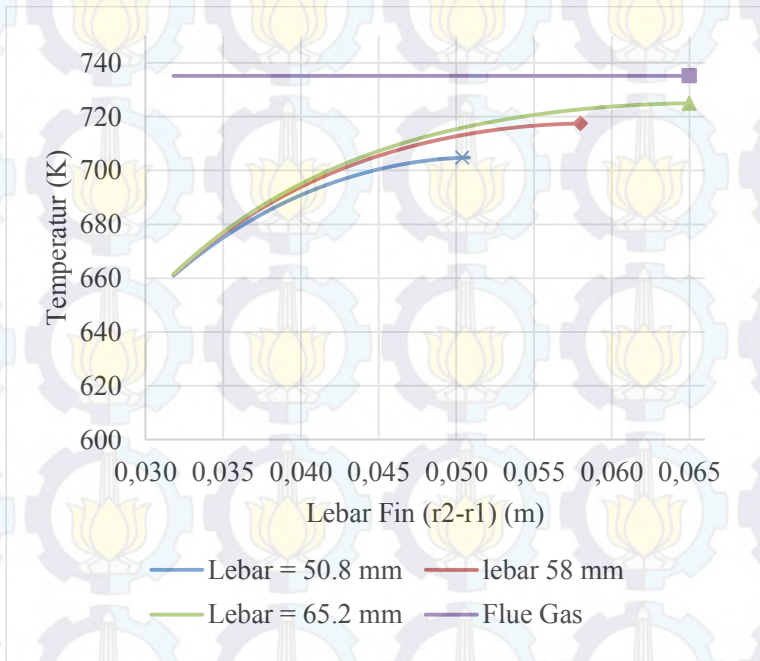
**Gambar 4.13** Kontur Distribusi Temperatur pada Circular Finned tube Superheater Jenis Material Carbon steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%, 0.1 < Si \leq 0.6$ ),  $T = 1$  mm dan lebar (a) 50.8 mm, (b) 58 mm, (c) 65 mm.

Gambar 4.12 dan 4.13 merupakan kontur distribusi temperatur *circular finned tube superheater* dengan jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), tebal *fin* 1 mm dan lebar *fin* divariasikan yaitu (a) 50.8 mm, 58 mm dan 65.2 mm. Warna merah menunjukkan nilai temperatur tertinggi dan warna biru tua menunjukkan nilai temperatur paling rendah. Dari ketiga gambar dapat dilihat bahwa distribusi temperatur memiliki *pattern* yang hampir serupa tetapi memiliki nilai temperatur yang berbeda. Nilai temperatur di bagian paling luar dari *fin* ( $l = 58$  mm) lebih tinggi dibandingkan bagian paling dalam dari *fin* ( $l = 31.8$  mm). Temperatur tertinggi terletak di bagian ujung bawah dari *fin* ( $l = 58$  mm) dan temperatur terendah terletak di bagian atas dari *fin* ( $l = 31.8$  mm). Pada kontur distribusi temperatur dapat dilihat bahwa temperatur paling tinggi dimiliki oleh *fin* dengan variasi lebar 65.2 mm dengan warna orange tua, lalu variasi lebar 58 mm dengan warna kontur distribusi temperatur orange dan variasi lebar 50.8 mm dengan warna kontur distribusi temperatur orange muda. Temperatur terendah tidak dapat dianalisis melalui kontur distribusi temperatur karena untuk ketiga jenis *fin* memiliki kontur temperatur terendah dengan warna biru tua.

Gambar 4.14 merupakan grafik distribusi temperatur pada *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $T = 1$  mm, dengan variasi lebar (50.8, 58 dan 65.2 mm). Distribusi temperatur diambil pada satu garis yang dianggap mewakili distribusi temperatur keseluruhan pada bagian *fin*. Distribusi temperatur diambil di bagian bawah *fin*, ditarik garis lurus dari ujung dalam *fin* ( $l = 31.8$  mm) sampai ujung luar *fin* ( $l = 58$  mm). Pada Gambar 4.16 dapat dilihat untuk variasi lebar *fin* 50.8 mm, temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 704.786 K dan terus menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 660.943 K. Variasi lebar *fin* 58 mm, temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 717.421 K dan terus menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang



terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 661.337 K. Varisasi lebar *fin* 65.2 mm, temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 724.337 K dan terus menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 661.502 K.



**Gambar 4.14** Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm, dengan Variasi Lebar *Fin* (50.8, 58 dan 65.2 mm)

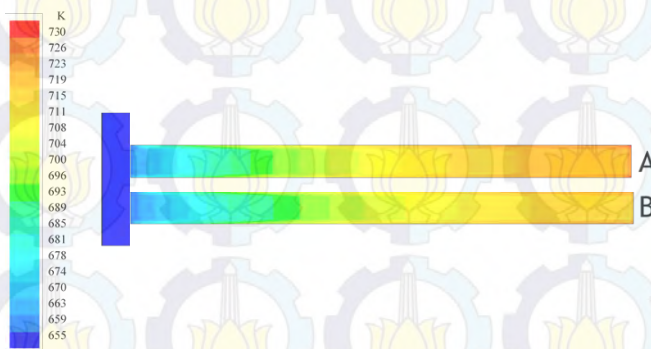
Perbedaan distribusi temperatur pada silinder sirkular dipengaruhi beberapa parameter. Hal tersebut sesuai rumus :

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

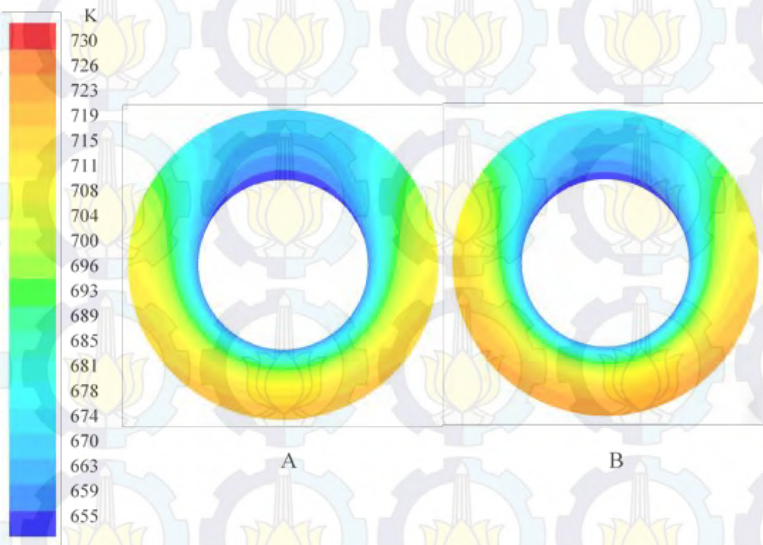


Pada persamaan untuk mencari laju perpindahan panas pada silinder sirkular. Nilai laju perpindahan panas berbanding lurus dengan kenaikan tebal dari silinder, koefisien konduksi dan perbedaan temperatur antar kedua sisi silinder. Selain itu berbanding terbalik dengan nilai logaritmik perbandingan jari-jari luar dan dalam silinder. Kenaikan lebar *fin* akan meningkatkan nilai logaritmik perbandingan antara jari-jari luar dan dalam silinder. Semakin lebar *fin* maka akan menurunkan nilai laju perpindahan panas ( $q$ ) dan meningkatkan nilai perbedaan temperatur ( $T_{s2} - T_{s1}$ ) pada *fin*. Kenaikan perbedaan temperatur ( $T_{s,1} - T_{s,2}$ ) tidak terjadi secara linier tetapi logaritmik, hal tersebut mengakibatkan pada suatu titik kenaikan nilai lebar *fin* tidak akan memberikan efek yang signifikan terhadap perubahan temperatur pada *fin*. Pada *fin* dengan variasi lebar 50.8 mm, 58 mm dan 65.2 mm didapatkan lebar optimum sebesar 59.23 mm. Hal tersebut dikarenakan penambahan lebar *fin* lebih dari 59.23 mm hanya akan meningkatkan temperatur fin kurang dari 0.2 K/0.4 mm dan nilainya terus menurun mendekati 0 K.

#### 4.2.3 Analisa Distribusi Temperatur dan Variasi Jenis Material *Fin*



**Gambar 4.15** Kontur Distribusi Temperatur pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) dan (b) Carbon Steel (Plain Carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ),  $L = 58$  mm dan  $T = 1$  mm

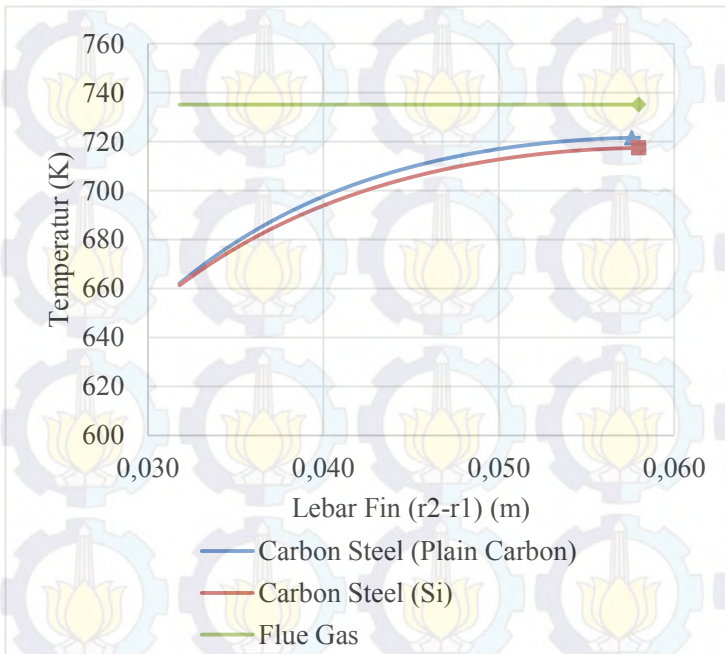


**Gambar 4.16** Kontur Distribusi Temperatur pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) dan (b) *Carbon Steel* (*Plain Carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ),  $L = 58$  mm dan  $T = 1$  mm

Gambar 4.15 dan 4.16 merupakan kontur distribusi temperatur *circular finned tube superheater* dengan tebal *fin* 1 mm, lebar *fin* 58 mm dan jenis material *fin* divariasikan yaitu (a) *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) dan (b) *carbon steel* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ). Warna merah menunjukkan nilai temperatur tertinggi dan warna biru tua menunjukkan nilai temperatur paling rendah. Dari gambar dapat dilihat bahwa distribusi temperatur memiliki *pattern* yang hampir serupa tetapi memiliki nilai temperatur yang berbeda. Nilai temperatur di bagian paling luar dari *fin* ( $l = 58$  mm) lebih tinggi dibandingkan bagian paling dalam dari *fin* ( $l = 31.8$  mm). Temperatur tertinggi terletak di bagian ujung bawah dari *fin* ( $l = 58$  mm) dan temperatur terendah terletak di bagian atas dari *fin* ( $l = 31.8$  mm). Pada kontur distribusi temperatur dapat dilihat bahwa



nilai temperatur variasi jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) dengan warna kontur distribusi temperatur orange lebih rendah dibandingkan variasi jenis material *carbon steel* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) dengan warna kontur distribusi temperatur orange tua. Temperatur terendah tidak dapat dianalisis melalui kontur distribusi temperatur karena untuk kedua jenis *fin* memiliki kontur temperatur terendah dengan warna biru tua.



**Gambar 4.17** Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada *Circular Finned Tube*,  $L = 58$  mm,  $T = 1$  mm dengan Variasi Jenis Material *Fin*

Gambar 4.17 merupakan grafik distribusi temperatur pada *circular finned tube superheater* dengan tebal *fin* 1 mm, lebar *fin* 58 mm dan jenis material *fin* divariasikan yaitu (a) *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), (b) *carbon steel* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ). Distribusi temperatur diambil



pada satu garis yang dianggap mewakili distribusi temperatur keseluruhan pada bagian *fin*. Distribusi temperatur diambil di bagian bawah *fin*, ditarik garis lurus dari ujung dalam *fin* ( $l = 31.8$  mm) sampai ujung luar *fin* ( $l = 58$  mm). Pada Gambar 4.19 dapat dilihat untuk variasi jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ), temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 717.421 K dan terus menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 661.337 K. Variasi jenis material *carbon steel* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) temperatur tertinggi terletak pada  $l = 58$  mm sebesar 721.607 K dan terus menurun secara logaritmik sampai pada temperatur terendah yang terletak pada  $l = 31.8$  mm sebesar 662.661 K.

Perbedaan distribusi temperatur pada silinder sirkular dipengaruhi beberapa parameter. Hal tersebut sesuai rumus :

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

Pada persamaan untuk mencari laju perpindahan panas pada silinder sirkular. Nilai laju perpindahan panas berbanding lurus dengan kenaikan tebal dari silinder, koefisien konduksi dan perbedaan temperatur antar kedua sisi silinder, selain itu berbanding terbalik dengan nilai logaritmik perbandingan jari-jari luar dan dalam silinder. Nilai koefisien konduksi berpengaruh pada distribusi temperatur. Sesuai dengan persamaan :

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} = UA(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$$

Semakin meningkat nilai koefisien konduksi maka tahanan termal material akan semakin berkurang. Hal tersebut berbanding lurus dengan meningkatnya laju perpindahan panas dan berbanding terbalik dengan nilai  $T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$ . Untuk material *carbon steel* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) dengan nilai koefisien konduksi 60.5 W/m memiliki distribusi temperatur yang lebih baik dibandingkan material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) dengan nilai koefisien konduksi 51.9 W/m.

### 4.3 Analisa Performa Circular Finned Tube Superheater

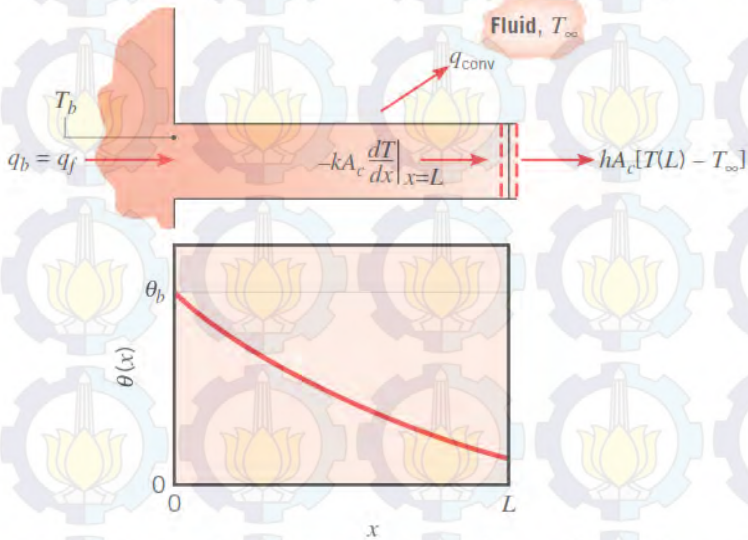
Performa *fin* dapat diketahui dengan menghitung efisiensi dan efektifitas dari *fin*. Persamaan untuk mencari efektifitas *fin* adalah :

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_{c,b}\theta_b} = \frac{h_{fin} A_{fin} (T_{avg} - T_{\infty})}{h_{fin} A_{tube} (T_b - T_{\infty})}$$

Sedangkan untuk mencari efisiensi *fin* adalah :

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{maks}} = \frac{hA_{fin} (T_{avg} - T_{\infty})}{hA_{fin} (T_b - T_{\infty})}$$

Persamaan efisiensi dan efektifitas diatas berdasarkan studi kasus *fin* sesuai dengan Gambar 4.18.

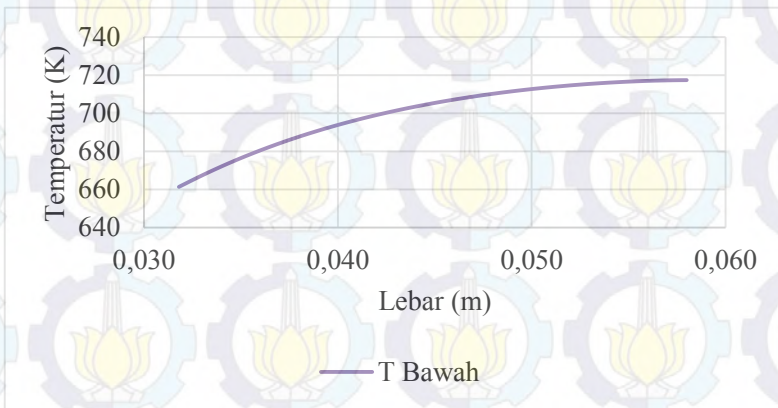


**Gambar 4.18** Distribusi Temperatur oleh Konduksi dan Konveksi pada *Fin*

Pada Gambar 4.18 *fin* sebagai perpanjangan luasan berfungsi untuk melepaskan panas dari *base* material ke lingkungan sekitar. Hal tersebut terlihat dari grafik distribusi



temperatur pada Gambar 4.18 dimana temperatur *base* lebih tinggi dibandingkan temperatur lingkungan sekitar. Sesuai dengan persamaan efektifitas *fin*, semakin banyak panas yang dapat dilepaskan ke lingkungan ( $q_{fin}$ ) oleh material dengan menggunakan *fin* dibandingkan dengan panas yang dilepaskan ke lingkungan ( $q_{base}$ ) oleh material tanpa menggunakan *fin* maka efektifitas *fin* akan semakin baik. Meningkatkan  $q_{fin}$  dilakukan dengan cara meningkatkan luas permukaan *fin* dan meningkatkan perbedaan temperatur antara  $(T_{avg} - T_{\infty})$ , semakin tinggi  $T_{avg, fin}$  maka panas yang dilepaskan oleh *fin* ( $q_{fin}$ ) akan semakin besar. Efisiensi *fin* merupakan perbandingan antara  $q_{fin}$  dengan  $q_{fin \text{ maks.}}$ .  $q_{fin}$  dianggap maksimal ketika temperatur di seluruh luas permukaan *fin* sama dengan temperatur di *base* material. Sesuai dengan studi kasus pada Gambar 4.20 maka semakin tinggi temperatur rata-rata di *fin* maka efisiensi *fin* akan meningkat.

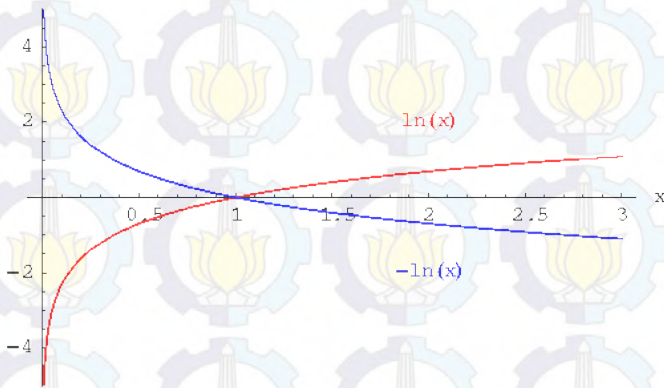


**Gambar 4.19** Grafik Distribusi Temperatur dan Jarak pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$

Gambar 4.19 memperlihatkan salah satu contoh distribusi temperatur pada penelitian yang dilakukan mengenai *circular finned tube superheater*. Untuk semua variasi tebal *fin*, lebar *fin* dan jenis material *fin* memiliki *trendline* grafik distribusi



temperatur seperti pada Gambar 4.19. *Trendline* grafik berbanding terbalik dengan studi kasus pada Gambar 4.18. Hal ini terjadi karena pada studi kasus *circular finned tube superheater*, temperatur *flue gas* lebih panas dibandingkan dengan temperatur pada *fin* dan *base* material. Untuk studi kasus Gambar 4.18 temperatur *fin* dan *base* material lebih panas dibandingkan temperatur lingkungan sekitar. Kedua grafik tersebut merupakan fungsi logaritmik sesuai dengan Gambar 4.20.



**Gambar 4.20** Grafik Fungsi Logaritmik

Perbedaan *trendline* distribusi temperatur pada studi kasus 4.18 dan 4.19 mengakibatkan persamaan untuk mencari efisiensi dan efektifitas tidak dapat digunakan pada studi kasus *circular finned tube superheater*. Pada studi kasus *circular finned tube superheater*  $T_{\infty} > T_{avg} > T_{base}$  sehingga persamaan untuk mencari efisiensi dan efektifitas adalah :

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_{c,b}\theta_b} = \frac{h_{fin} A_{fin} (T_{\infty} - T_{avg})}{h_{fin} A_{tube} (T_{\infty} - T_b)}$$

Sedangkan untuk mencari efisiensi fin adalah :

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{maks}} = \frac{hA_{fin} (T_{\infty} - T_{avg})}{hA_{fin} (T_{\infty} - T_b)}$$

Persamaan di atas menghasilkan sebuah nilai yang kontradiktif dengan persamaan efisiensi dan efektifitas pada studi kasus Gambar 4.18. Pada studi kasus Gambar 4.19 *fin* berfungsi untuk menyerap panas dari *flue gas* ke bagian dalam *tube* yang berisi *steam*. Untuk meningkatkan penyerapan panas maka  $q_{fin}$  harus diperbesar dengan cara meningkatkan luas permukaan *fin* dan temperatur rata-rata pada luas permukaan *fin*. Akan tetapi ketika temperatur rata-rata pada luas permukaan *fin* meningkat berbanding terbalik dengan nilai  $q_{fin}$  karena perumusan  $(T_{\infty} - T_{avg})$ . Dengan perumusan tersebut maka jika temperatur rata-rata pada luas permukaan *fin* meningkat maka nilai efisiensi dan efektifitas *fin* akan menurun sehingga terjadi kontradiksi hasil simulasi jika ditampilkan dalam bentuk nilai efisiensi dan efektifitas *fin*. Hasil dari perhitungan efisiensi dan efektifitas *circular finned tube superheater* akan ditampilkan pada pembahasan di sub bab selanjutnya.

Cara lain yang dapat digunakan untuk mencari efisiensi dan efektifitas *fin* adalah dengan menggunakan persamaan Bessel. Efisiensi *fin* dapat dicari dengan persamaan :

$$\eta_f = \frac{q_f}{h2\pi(r_2^2 - r_1^2)\theta_b}$$

$$\eta_f = \frac{2r_1}{m(r_2^2 - r_1^2)} \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_2) - I_1(mr_1)K_1(mr_2)}{K_0(mr_1)I_1(mr_2) - I_0(mr_1)K_1(mr_2)}$$

$$m = \sqrt{\left(\frac{2h}{kb}\right)}$$

dimana :

k = Konduktivitas material *fin* (W/m K)

b = Tebal *fin* (m)

h = Koefisien konveksi (W m<sup>2</sup>.K)



Untuk mendapatkan efektifitas dari *fin* dapat menggunakan persamaan :

$$\varepsilon_f = \frac{1 - (1 - \eta_f)A_f}{A_t}$$

Studi kasus yang digunakan untuk membuat persamaan Bessel menggunakan studi kasus pada Gambar 4.18 dimana *fin* melepaskan panas dari *base* material ke lingkungan. Perhitungan dengan menggunakan persamaan Bessel tidak menghasilkan data yang rasional jika diterapkan dalam dalam studi kasus *circular finned tube superheater* karena nilai efisiensi yang melebihi 100% dan nilai efektifitas yang sangat besar. Hasil dari perhitungan efisiensi dan efektifitas *circular finned tube superheater* dengan persamaan Bessel akan ditampilkan pada pembahasan di sub bab selanjutnya.

Cara lain untuk mendapatkan nilai efisiensi dan efektifitas *fin* adalah dengan meninjau perpindahan panas di *fin* secara konduksi, sesuai dengan persamaan :

$$q_{konveksi} = q_{konduksi}$$

$$k \frac{A_{c,fin}}{L} (T_{s2} - T_{s1}) = (h A_{fin} T_{\infty} - T_{s2})$$

Maka untuk mencari efektifitas *fin* secara konduksi menggunakan persamaan :

$$\varepsilon_f = \frac{k (2\pi r_2 + 2\pi r_1) (T_{tip} - T_{base})}{k 2\pi r_1 (T_{base} - T_{tube})}$$

Sedangkan untuk mencari efisiensi *fin* adalah :

$$\eta_f = \frac{k (2\pi r_2 + 2\pi r_1) (T_{tip} - T_{base})}{k (2\pi r_2 + 2\pi r_1) (T_{\infty} - T_{base})}$$

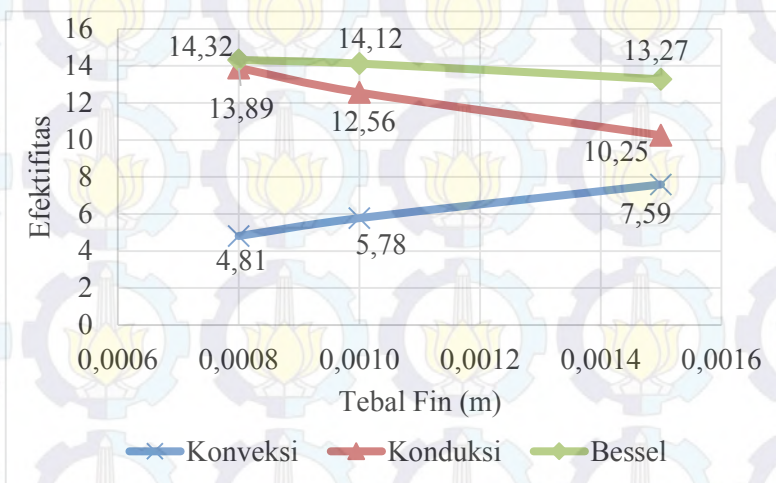
Dengan menggunakan kedua persamaan tersebut maka efisiensi dan efektifitas dari *fin* dapat dicari. Perhitungan menggunakan



pendekatan konduksi memiliki hasil *trendline* efisiensi dan efektifitas sesuai dengan teori pada setiap jenis variasi, akan tetapi nilainya kurang rasional, untuk efisiensi nilainya terlalu kecil dan untuk efektifitas,  $q_{fin}$ , dan  $q_{tube}$  nilainya terlalu besar. Hasil dari perhitungan efisiensi dan efektifitas *circular finned tube superheater* secara konduksi akan ditampilkan pada pembahasan di sub bab selanjutnya.

#### 4.4. Analisa Efektifitas dan Efisiensi Terhadap Variasi Tebal Fin

##### 4.4.1 Analisa Efektifitas Terhadap Variasi Tebal Fin



**Gambar 4.21** Grafik Efektifitas terhadap Tebal pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material Carbon Steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm

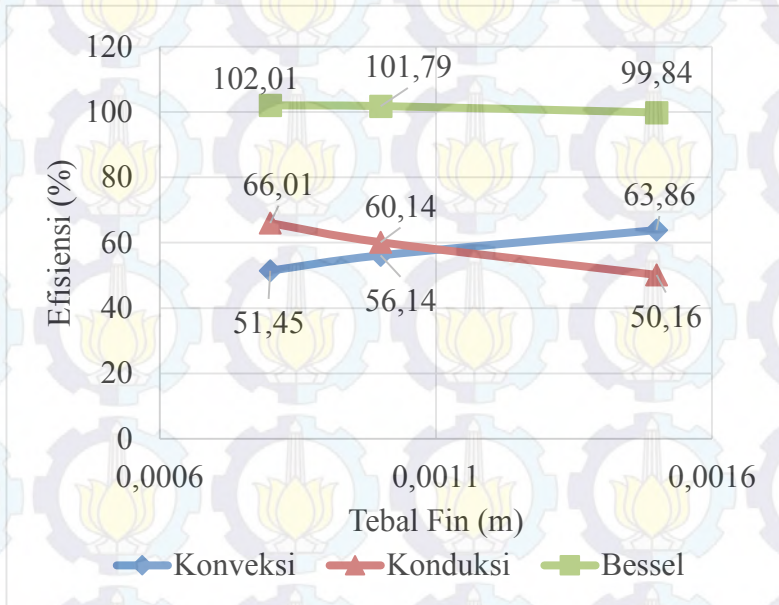
Pada Gambar 4.21 menunjukkan grafik perbandingan efektifitas terhadap tebal dari *fin* pada *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel* (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm dengan variasi tebal (0.8 mm, 1 mm dan 1.5 mm). Pada grafik menunjukkan efektifitas *fin* dengan menggunakan analisis konveksi untuk tebal 0.8 mm sebesar 4.809

untuk tebal *fin* 1 mm sebesar 5.775 dan untuk tebal *fin* 1.5 mm sebesar 5.775. Nilai efektifitas tertinggi adalah pada tebal *fin* 1.5 mm sebesar 7.594 dan terus mengalami peningkatan berbanding lurus dengan penambahan tebal dari *fin*. Efektifitas terendah terletak pada tebal *fin* 0.8 mm sebesar 4.809. Efektifitas *fin* dengan menggunakan persamaan Bessel untuk tebal *fin* 0.8 mm sebesar 14.32 untuk tebal *fin* 1 mm sebesar 14.124 dan untuk tebal *fin* 1.5 mm sebesar 13.272. Nilai efektifitas tertinggi adalah pada tebal *fin* 0.8 mm sebesar 14.32 dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan pengurangan tebal dari *fin*. Efektifitas terendah terletak pada tebal *fin* 1.5 mm sebesar 13.272. Efektifitas *fin* dengan menggunakan analisis konduksi untuk tebal *fin* 0.8 mm sebesar 13.892 untuk tebal *fin* 1 mm sebesar 12.562 dan untuk tebal *fin* 1.5 mm sebesar 10.25. Nilai efektifitas tertinggi adalah pada tebal *fin* 0.8 mm sebesar 13.892 dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan penambahan tebal dari *fin*. Efektifitas terendah terletak pada tebal *fin* 1.5 mm sebesar 10.25.

Hasil perhitungan efektifitas dengan analisa konveksi tidak dapat divalidasi karena berbanding terbalik dengan temperatur rata-rata variasi tebal *fin* 0.8, 1 dan 1.5 mm berturut-turut adalah 691.456 K, 688.256 K dan 682.496 K. Hasil perhitungan efektifitas menggunakan persamaan Bessel tidak dapat divalidasi karena untuk mencari efektifitas menggunakan persamaan  $\varepsilon_f = \frac{1-(1-\eta_f)A_f}{A_t}$ , sedangkan nilai efesiensi tidak valid karena lebih dari 100%. Hasil *trendline* efektifitas menggunakan persamaan konduksi berbanding lurus dengan *trendline* temperatur rata-rata variasi tebal *fin* 0.8, 1 dan 1.5 mm berturut-turut adalah 691.456 K, 688.256 K dan 682.496 K. Nilai efektifitas tidak dapat divalidasi karena nilainya terlalu besar dan tidak rasional.



#### 4.4.2 Analisa Efisiensi Terhadap Variasi Tebal Fin



**Gambar 4.22** Grafik Efisiensi terhadap tebal pada *Circular Finned tube Superheater* Jenis Material *Carbon steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ,  $L = 58$  mm)

Pada gambar 4.22 menunjukkan grafik perbandingan efisiensi terhadap tebal dari *fin* pada *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ,  $L = 58$  mm) dengan variasi tebal (0.8 mm, 1 mm, dan 1.5 mm). Pada grafik menunjukkan efisiensi fin dengan menggunakan analisa konveksi untuk tebal *fin* 0.8 mm sebesar 51.451 % untuk tebal *fin* 1 mm sebesar 56.137 % dan untuk tebal *fin* 1.5 mm sebesar 63.862 %. Efisiensi tertinggi adalah pada tebal *fin* 1.5 mm sebesar 63.862 %. dan terus mengalami kenaikan berbanding lurus dengan penambahan tebal dari *fin*. Efisiensi terendah terletak pada tebal *fin* 1,5 mm sebesar 51.451 %. Efisiensi



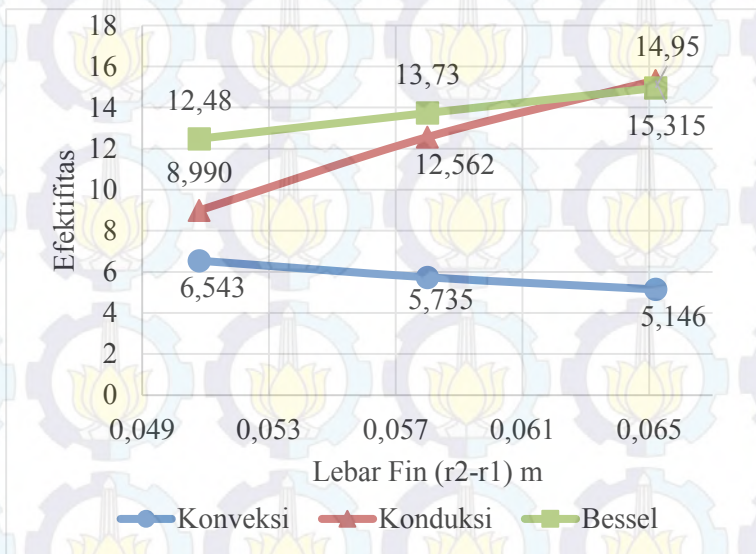
fin dengan persamaan Bessel untuk tebal *fin* 0.8 mm sebesar 102.011% untuk tebal *fin* 1 mm sebesar 101.789% dan untuk tebal *fin* 1.5 mm sebesar 99.839%. Nilai efisiensi tertinggi adalah pada tebal *fin* 0.8 mm sebesar 102.011 dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan pengurangan tebal dari *fin*. Efisiensi terendah terletak pada tebal *fin* 1.5 mm sebesar 99.839%. Efisiensi fin dengan analisa konduksi untuk tebal *fin* 0.8 mm sebesar 66.007 untuk tebal *fin* 1 mm sebesar 60.137 dan untuk tebal *fin* 1.5 mm sebesar 50.156. Nilai efisiensi tertinggi adalah pada tebal *fin* 0.8 mm sebesar 66.007 dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan penambahan tebal dari *fin*. Efisiensi terendah terletak pada tebal *fin* 1.5 mm sebesar 50.156.

Hasil perhitungan efisiensi dengan analisa konveksi tidak dapat divalidasi karena berbanding terbalik dengan temperatur rata-rata variasi tebal *fin* 0.8, 1, dan 1.5 mm berturut-turut adalah 691,456 K, 688,256 K dan 682,496 K. Hasil perhitungan efisiensi menggunakan persamaan Bessel tidak dapat divalidasi karena nilai efisiensi lebih dari 100%. Hasil *Trendline* efisiensi dengan analisa konduksi berbanding lurus dengan *trendline* temperatur rata-rata variasi tebal *fin* 0.8, 1, dan 1.5 mm berturut-turut adalah 691,456 K, 688,256 K dan 682,496 K. Nilai efisiensi tidak dapat divalidasi karena nilainya terlalu kecil dan tidak rasional, selain itu perbedaan nilai efisiensi dengan variasi tebal fin terlalu besar.

#### 4.5. Analisa Efektifitas dan Efisiensi Terhadap Variasi Lebar *Fin*.

##### 4.5.1 Analisa Efektifitas Terhadap Variasi Lebar *Fin*.

Pada gambar 4.23 menunjukkan grafik perbandingan efektifitas terhadap lebar dari *fin* pada *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $t = 1$  mm dengan variasi lebar (65,2 mm, 58 mm, dan 50.8 mm). Pada grafik menunjukkan efektifitas fin dengan



**Gambar 4.23** Grafik Efektifitas terhadap Lebar pada *Circular Finned tube Superheater* Jenis Material *Carbon steel (Carbon + Silicon, Mn ≤ 1%, 0.1 < Si ≤ 0.6%), t<sub>r</sub> = 1 mm*

menggunakan analisa konveksi untuk lebar *fin* 50.8 mm sebesar 6,543 untuk lebar *fin* 58 mm sebesar 5,734 dan untuk lebar *fin* 65.2 mm sebesar 5.145. Nilai efektifitas tertinggi adalah pada lebar *fin* 50.8 mm sebesar 6,543 dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan penambahan lebar dari *fin*. efektifitas terendah terletak pada lebar *fin* 65.2 mm sebesar 5.145. Efektifitas menggunakan persamaan Bessel untuk lebar *fin* 50.8 mm sebesar 12.481 untuk lebar *fin* 58 mm sebesar 13.734 dan untuk lebar *fin* 65.2 mm sebesar 14.954 Nilai efektifitas tertinggi adalah pada lebar *fin* 65.2 mm sebesar 14.954 dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan pengurangan lebar dari *fin*. efektifitas terendah terletak pada lebar *fin* 50.8 mm sebesar 12.481. Efektifitas menggunakan analisa konduksi untuk lebar *fin* 50.8 mm sebesar 8.99 untuk lebar *fin* 58 mm sebesar 12.562 dan untuk lebar *fin* 65.2 mm sebesar 15.315. Nilai efektifitas tertinggi adalah pada lebar *fin*



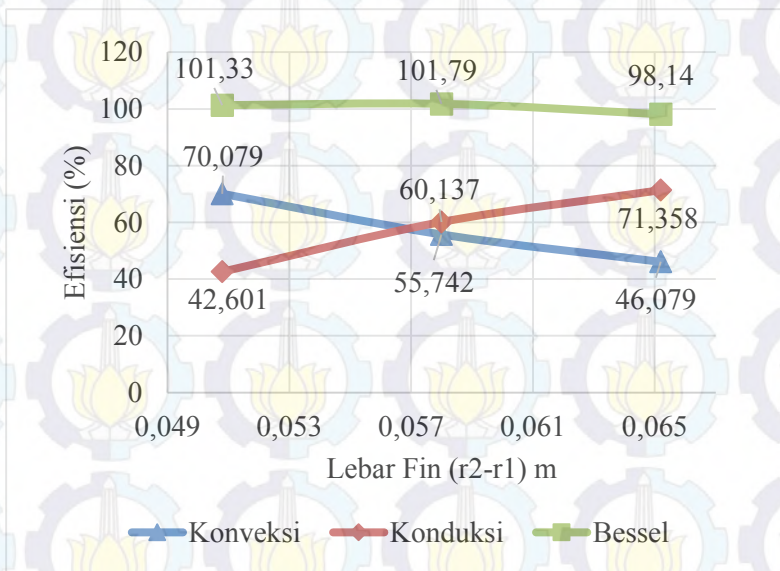
65.2 mm sebesar 15.315 dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan berkurangnya lebar dari *fin*. efektifitas terendah terletak pada lebar *fin* 50.8mm sebesar 8.99.

Hasil perhitungan efektifitas dengan menggunakan analisa konveksi tidak dapat divalidasi karena berbanding terbalik dengan temperatur rata-rata variasi lebar *fin* 50.8, 58, dan 65.2 mm berturut-turut adalah 678,642 K, 688,256 K dan 696.099 K. Hasil perhitungan efektifitas menggunakan persamaan Bessel tidak dapat divalidasi karena untuk mencari efektifitas menggunakan persamaan  $\varepsilon_f = \frac{1-(1-\eta_f)A_f}{A_t}$ , sedangkan nilai efesiensi tidak valid karena lebih dari 100%. Hasil Perhitungan menggunakan analisa konduksi, *trendline* efektifitas berbanding lurus dengan *trendline* temperatur rata-rata variasi tebal *fin* 0.8, 1, dan 1.5 mm berturut-turut adalah 691,456 K, 688,256 K dan 682,496 K. Nilai efektifitas tidak dapat divalidasi karena nilainya terlalu besar dan tidak rasional.

#### 4.5.2 Analisa Efisiensi Terhadap Variasi Lebar *Fin*.

Pada gambar 4.24 menunjukkan grafik perbandingan efisiensi terhadap lebar dari *fin* pada *circular finned tube superheater* jenis material *carbon steel (carbon + silicon, Mn ≤ 1%, 0.1 < Si ≤ 0.6%)*,  $t = 1$  mm dengan variasi lebar (50.8 mm, 58 mm, dan 65.2 mm). ). Pada grafik menunjukkan efisiensi *fin* dengan menggunakan analisa konveksi untuk lebar *fin* 50.8 mm sebesar 70.079 % untuk lebar *fin* 58 mm sebesar 55.741 % dan untuk lebar *fin* 65.2 mm sebesar 46.078 %. Efisiensi tertinggi adalah pada lebar *fin* 50.8 mm sebesar 70.079 % dan terus mengalami penurunan berbanding lurus dengan penambahan lebar dari *fin*. Efisiensi terendah terletak pada lebar *fin* 50.8 mm sebesar 46.078 %. Efisiensi *fin* dengan menggunakan persamaan Bessel untuk lebar *fin* 50.8 mm sebesar 101.326% untuk lebar *fin* 58 mm sebesar 101.789% dan untuk lebar *fin* 65.2 mm sebesar 98.142% Nilai efisiensi tertinggi adalah pada lebar *fin* 58 mm sebesar 101.789%. Efisiensi terendah terletak pada lebar *fin* 65.2 mm sebesar 98.142%





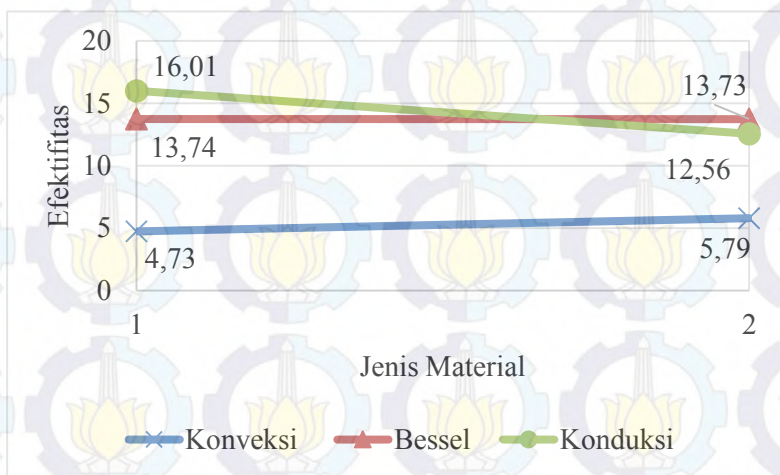
**Gambar 4.24** Grafik Efisiensi terhadap lebar pada *Circular Finned tube Superheater* Jenis Material *Carbon steel (Carbon + Silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $T = 1\text{mm}$ .*

Hasil perhitungan efisiensi menggunakan analisa konveksi tidak dapat divalidasi karena berbanding terbalik dengan temperatur rata-rata variasi lebar *fin* 50.8, 58, dan 65.2 mm berturut-turut adalah 678,642 K, 688,256 K dan 696.099 K. Hasil perhitungan efisiensi menggunakan persamaan Bessel tidak dapat divalidasi karena nilai efisiensi lebih dari 100%. Hasil perhitungan efisiensi menggunakan analisa konduksi, *trendline* efisiensi berbanding lurus dengan *trendline* temperatur rata-rata variasi tebal *fin* 0.8, 1, dan 1.5 mm berturut-turut adalah 691,456 K, 688,256 K dan 682,496 K. Nilai efisiensi dengan menggunakan analisa konveksi tidak dapat divalidasi karena nilainya terlalu kecil dan tidak rasional.

#### 4.6. Analisa Efektifitas dan Efisiensi Terhadap Jenis Material *Fin*.

##### 4.6.1 Analisa Efektifitas Terhadap Jenis Material *Fin*.

Pada gambar 4.25 menunjukkan grafik perbandingan efektifitas dengan jenis material pada *circular finned tube superheater*,  $l=58\text{mm}$ ,  $t=1\text{ mm}$ , jenis material *fin* divariasikan yaitu *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) (1)*, dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) (2)*. Pada grafik menunjukkan efisiensi fin dengan menggunakan analisa konveksi untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 4.732 dan untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 5.791. Efektifitas fin dengan persamaan Bessel untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 13.741 dan untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 13.734. Efektifitas fin dengan analisa secara konduksi efektifitas untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 12.562 dan untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 16.008



**Gambar 4.25** Grafik Efektifitas terhadap jenis material pada *Circular Finned tube Superheater*,  $L=58$  dan,  $T=1\text{ mm}$ .



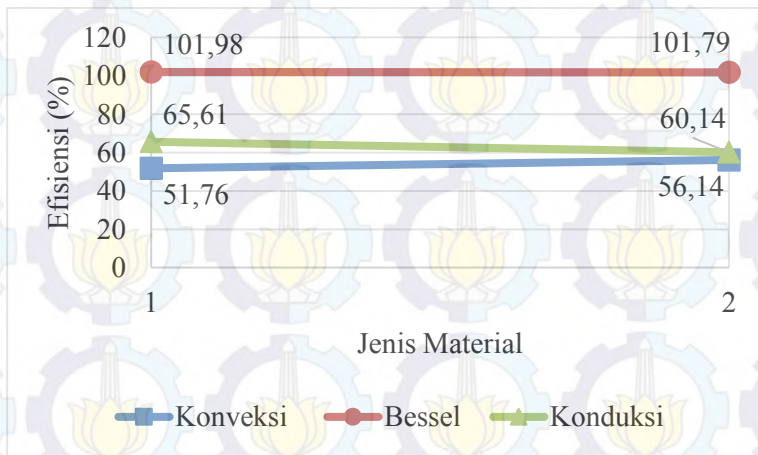
Hasil perhitungan efektifitas dengan menggunakan analisa konveksi tidak dapat divalidasi karena berbanding terbalik dengan temperatur rata-rata variasi jenis material *fin carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ )* mm berturut-turut adalah 691.647 K dan 688,256. Nilai efektifitas juga berbanding terbalik dengan koefisien konduksi untuk variasi jenis material *fin carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ )* mm berturut-turut adalah 60.5 W/m.K dan 51.9 W/m.K. Hasil perhitungan efektifitas menggunakan persamaan Bessel tidak dapat divalidasi karena untuk mencari efektifitas menggunakan persamaan  $\epsilon_f = \frac{1-(1-\eta_f)A_f}{A_t}$ , sedangkan nilai efesiensi tidak valid karena lebih dari 100. Hasil perhitungan efektifitaws dengan menggunakan analisa konduksi, *trendline* efektifitas berbanding lurus dengan *trendline* temperatur rata-rata variasi jenis material *fin carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ )* mm berturut-turut adalah 691.647 K dan 688,256. Nilai efektifitas juga berbanding lurus dengan koefisien konduksi untuk variasi jenis material *fin carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ )* mm berturut-turut adalah 60.5 W/m.K dan 51.9 W/m.K. Nilai efektifitas tidak dapat divalidasi karena nilainya terlalu besar dan tidak rasional.

#### 4.6.2 Analisa Efisiensi Terhadap Jenis Material *Fin*.

Pada gambar 4.26 menunjukkan grafik perbandingan efektifitas dengan jenis material pada *circular finned tube superheater*,  $l = 58\text{mm}$ ,  $t = 1\text{ mm}$ , jenis material *fin* divariasikan yaitu *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* (1), dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ )* (2). Pada grafik menunjukkan efisiensi fin dengan menggunakan analisa konveksi untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 51.762% dan untuk jenis material



*carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 56.137%. Efisiensi fin dengan persamaan Bessel untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 101.981 dan untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* 101.789. Efisiensi fin dengan menggunakan analisa konduksi untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 65.61% dan untuk jenis material *carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* sebesar 60.14%

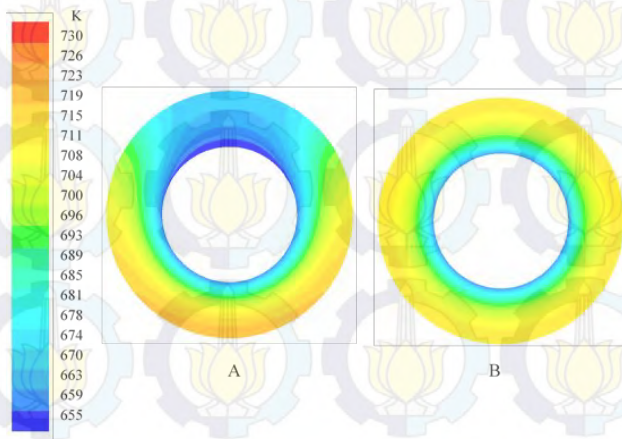


**Gambar 4.26** Grafik Efisiensi terhadap jenis material pada *Circular Finned tube Superheater*,  $L = 58$  dan,  $T = 1$  mm.

Hasil perhitungan efisiensi dengan menggunakan analisa konveksi tidak dapat divalidasi karena berbanding terbalik dengan temperatur rata-rata variasi jenis material *fin carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ )* mm berturut-turut adalah 691.647 K, 688,256 K. Nilai efektifitas juga berbanding terbalik dengan koefisien konduksi untuk variasi jenis material *fin carbon steel (plain carbon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ )* dan *carbon steel (carbon + silicon,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ )* mm berturut-turut adalah 60.5 W/m.K dan 51.9 W/m.K. Hasil perhitungan efisiensi menggunakan

persamaan Bessel tidak dapat divalidasi karena nilai efisiensi lebih dari 100%. Hasil perhitungan efisiensi dengan analisa konduksi, *trendline* efisiensi berbanding lurus dengan *trendline* temperatur rata-rata variasi jenis material *fin carbon steel* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) dan *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) mm berturut-turut adalah 691.647 K dan 688,256. Nilai efisiensi juga berbanding lurus dengan koefisien konduksi untuk variasi jenis material *fin carbon steel* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ) dan *carbon steel* (*carbon + silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ) mm berturut-turut adalah 60.5 W/m.K dan 51.9 W/m.K. Nilai efisiensi tidak dapat divalidasi karena nilainya terlalu kecil dan tidak rasional.

#### 4.7. Analisa Pengaruh Radiasi Terhadap Distribusi Temperatur Pada *Circular Finned tube Superheater*



**Gambar 4.27** Kontur Distribusi Temperatur pada *Circular Finned tube Superheater* Jenis Material *Carbon steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm, dan  $T = 1$  mm (a) Radiasi Diabaikan (b) Radiasi Tidak Diabaikan



Batasan masalah dalam penelitian ini adalah mengabaikan radiasi yang terjadi pada sistem. Hal tersebut dikarenakan pengaruh radiasi dianggap tidak terlalu signifikan terhadap perubahan temperatur di *circular finned tube superheater*. Untuk membuktikan hal tersebut maka perlu dilakukan simulasi numerik untuk membandingkan pengaruh radiasi pada sistem. Persamaan untuk mencari heat flux radiasi adalah  $q'' = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$ . Pada penelitian ini dikarenakan nilai dari luas permukaan fin kecil dan  $(T_s - T_{sur})$  yang tidak signifikan sehingga pengaruh radiasi diabaikan.

Pada gambar 2.28 dapat dilihat pengaruh radiasi akan menyebabkan kontur distribusi temperatur merata di setiap sisi luas permukaan fin sedangkan tanpa pengaruh radiasi dapat dilihat bahwa distribusi temperatur tidak merata dipengaruhi kecepatan aliran dan konveksi berpengaruh terhadap distribusi temperatur. Temperatur rata-rata luas permukaan fin dengan mengabaikan radiasi adalah 688.518 K sedangkan jika tidak mengabaikan radiasi adalah 698.066 K. Selisih temperatur sebesar 9.548 K walaupun nilai perubahan temperatur relatif kecil tetapi akan berpengaruh terhadap performa dari *circular finned tube superheater*. Oleh karena itu untuk penelitian kedepannya disarankan untuk tidak mengabaikan pengaruh radiasi pada permodelan *circular finned tube superheater*.





*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya :

1. Penambahan *fin* pada *circular tube superheater* meningkatkan nilai laju perpindahan panas.
2. Penambahan lebar *fin* akan meningkatkan nilai temperatur rata-rata pada luas permukaan *fin* dan lebar *fin* optimum adalah 59.23 mm.
3. Penambahan tebal *fin* tidak memberikan efek yang signifikan terhadap temperatur rata-rata pada luas permukaan *fin*.
4. Penambahan nilai koefisien konduksi pada material *fin* meningkatkan nilai temperatur rata-rata pada luas permukaan *fin* dan variasi material terbaik adalah menggunakan *carbon steels* (*plain carbon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $Si \leq 0.1\%$ ).
5. Nilai efisiensi dan efektifitas untuk studi kasus *circular finned tube superheater*, semakin rendah efisiensi dan efektifitas maka performa fin akan semakin baik.

### 5.2 Saran

Berikut ini adalah beberapa saran untuk penelitian berikutnya, yaitu :

1. Melakukan penelitian dengan menggunakan lebih dari satu *fin* yang disusun secara *in-line* atau *staggered*.
2. Melakukan penelitian dengan memvariasikan temperatur *infinite* pada sisi dalam *tube* untuk mengetahui pengaruh koefisien konveksi di dalam *tube*.
3. Melakukan penelitian dengan memvariasikan kecepatan *flue gas* yang melewati *circular finned tube superheater* untuk mengetahui pengaruh kecepatan *flue gas* terhadap performa *fin*.

## DAFTAR PUSTAKA

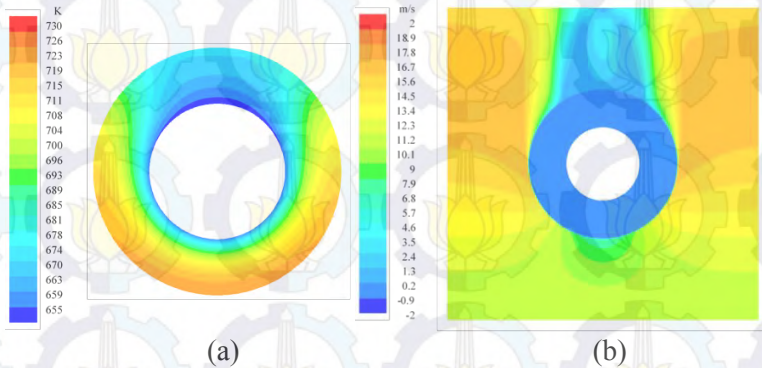
- Fox, Robert W., Pritchard, P.J. dan McDonald, Alan T. 2010. ***Introduction to Fluid Mechanics*** (7th Edition). Asia: John Wiley & Sons.
- Incropera, Frank P., De Witt, David P. (2002). ***Fundamental of Heat and Mass Transfer***. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Kitto, J.B. dan S.C. Stultz. 2005. ***Steam Its Generation an Use***. Amerika: The Babcock & Wilcox Company.
- Moran, Michael J. dan Shapiro, H.N. 2006. ***Fundamentals of Engineering Thermodynamics*** (5th Edition). Inggris: John Wiley & Sons.
- Mon, Mi Sandar. (2003). ***Numerical Investigation of Air-Side Heat Transfer and Pressure Drop in Circular Finned-Tube Heat Exchangers***. Jerman: TU Bergakademie Freiberg.
- Pusat Pendidikan dan Pelatihan PT. PLN. ***Teori Dasar HRSG***. Jakarta: PT. Perusahaan Listrik engara
- Ganaphaty, V. ***Steam Generator and Waste Heat Boilers For Process and Plant Engineers***. London: Taylor & Francis Group.



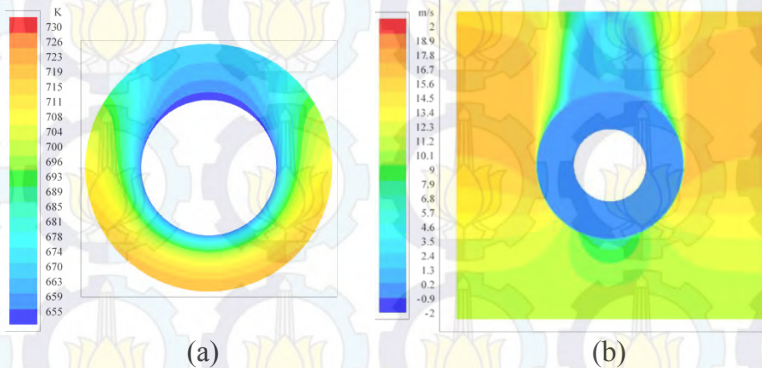


*Halaman ini sengaja dikosongkan*

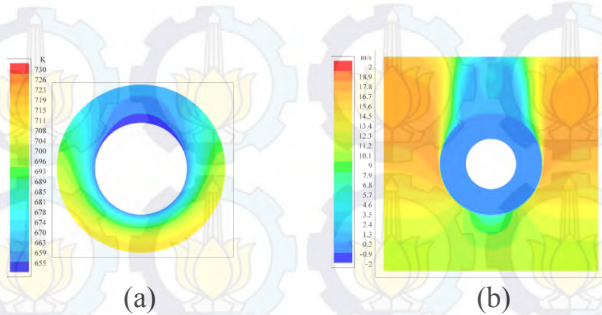
## LAMPIRAN A VISUALISASI KONTUR RASIO KECEPATAN DAN TEMPERATUR



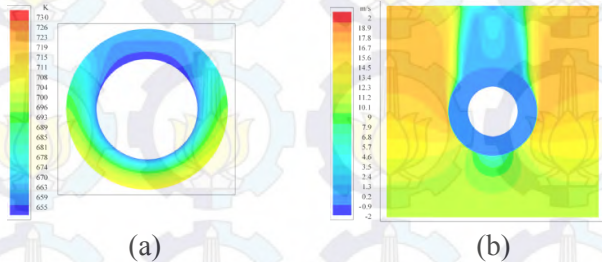
**Gambar A.1** Visualisasi (a) Kontur Temperatur (b) Kontur Kecepatan pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 0.8 \text{ mm}$



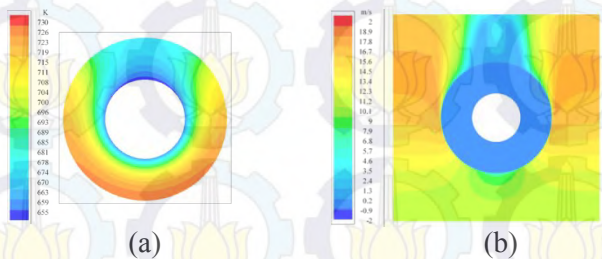
**Gambar A.2** Visualisasi (a) Kontur Temperatur (b) Kontur Kecepatan pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$



**Gambar A.3** Visualisasi (a) Kontur Temperatur (b) Kontur Kecepatan pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58 \text{ mm}$  dan  $T = 1.5 \text{ mm}$

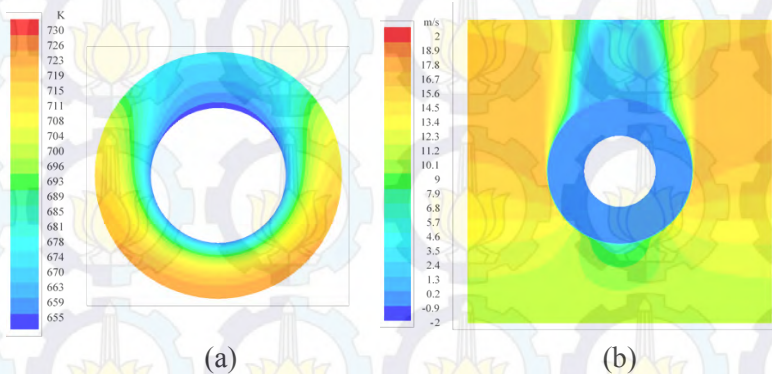


**Gambar A.4** Visualisasi (a) Kontur Temperatur (b) Kontur Kecepatan pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 50.8 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$

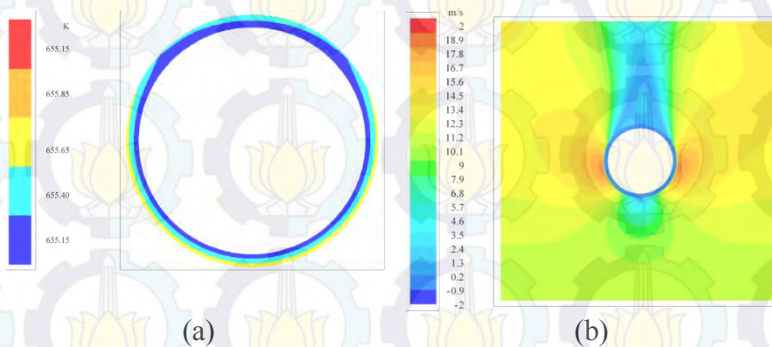


**Gambar A.5** Visualisasi (a) Kontur Temperatur, (b) Kontur Kecepatan pada *Circular Finned tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 65.2 \text{ mm}$  dan  $T = 1 \text{ mm}$





**Gambar A.6** Visualisasi (a) Kontur Temperatur (b) Kontur Kecepatan pada *Circular Finned Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Manganese + Silicon*,  $1\% \leq Mn \leq 1.65\%$ ,  $0.1\% < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 58$  mm dan  $T = 1$  mm



**Gambar A.7** Visualisasi (a) Kontur Temperatur (b) Kontur Kecepatan pada *Tube Superheater* Jenis Material *Carbon Steel* (*Carbon + Silicon*,  $Mn \leq 1\%$ ,  $0.1 < Si \leq 0.6\%$ ),  $L = 31.8$  mm dan  $T = 1$  mm

**LAMPIRAN B**  
**PRANDTL NUMBER, REYNOLD NUMBER, NUSSELT**  
**NUMBER, KOEFISIEN KONVEKSI, KECEPATAN**  
**FLUE GAS**

**Tabel B.1** Properti Fluida Kerja

Properti	Nilai	Satuan
Laju aliran massa ( $\dot{m}$ )	50.51	kg/s
Diameter dalam <i>tube</i> ( $d_{in}$ )	0.0318	m
<i>Viscosity</i> ( $\mu$ )	0,00002265	N.s/m <sup>2</sup>
Kalor Spesifik ( $C_p$ )	2058.987	J/kg.K
Koefisien Konduksi ( $k$ )	0.0468223	W/m.K
<i>Reynold Number</i> (Re)	427.755,174	-
<i>Prandtl Number</i> (Pr)	0.996	-
<i>Nusselt Number</i> (Nu)	734.499	-
Koefisien Konveksi ( $h$ )	1202.481	W/m <sup>2</sup> .K

**Tabel B.2** Perhitungan Kecepatan *Flue Gas*

Properti	Nilai	Satuan
Laju Aliran Massa <i>Flue Gas</i> ( $\dot{m}$ )	416.66667	kg/s
Massa Jenis ( $\rho$ )	0.335528	kg/m <sup>3</sup>
Lebar <i>Superheater</i> ( $l$ )	7.26	m
Panjang <i>Superheater</i> ( $p$ )	16.12	m
Kecepatan <i>Flue Gas</i> ( $v$ )	10.611	m/s

## LAMPIRAN C

### TABEL DISTRIBUSI TEMPERATUR

**Tabel C.1** Distribusi Temperatur *Circular Finned Tube*  
Superheater dengan Variasi Jenis Material

<b>Jenis Material <i>Carbon Steel</i> (Plain Carbon)</b>		<b>Jenis Material <i>Carbon Steel</i> (Carbon + Silicon)</b>	
<b>Lebar (mm)</b>	<b>Temperatur (K)</b>	<b>Lebar (mm)</b>	<b>Temperatur (K)</b>
0,0318	662,091	0,0318	661,337
0,0322	664,390	0,0322	663,401
0,0326	666,661	0,0326	665,443
0,0330	668,874	0,0330	667,435
0,0334	671,022	0,0334	669,373
0,0338	673,102	0,0338	671,255
0,0342	675,115	0,0342	673,081
0,0346	677,063	0,0346	674,852
0,0350	678,947	0,0350	676,570
0,0354	680,769	0,0354	678,235
0,0358	682,530	0,0358	679,849
0,0362	684,232	0,0362	681,413
0,0366	685,877	0,0366	682,929
0,0370	687,467	0,0370	684,398
0,0374	689,003	0,0374	685,822
0,0378	690,487	0,0378	687,201
0,0382	691,921	0,0382	688,537
0,0387	693,306	0,0387	689,831
0,0391	694,643	0,0391	691,084
0,0395	695,934	0,0395	692,297



0,0399	697,180	0,0399	693,471
0,0403	698,383	0,0403	694,608
0,0407	699,544	0,0407	695,708
0,0411	700,663	0,0411	696,772
0,0415	701,743	0,0415	697,801
0,0419	702,785	0,0419	698,796
0,0423	703,788	0,0423	699,757
0,0427	704,755	0,0427	700,687
0,0431	705,687	0,0431	701,584
0,0435	706,584	0,0435	702,451
0,0439	707,448	0,0439	703,288
0,0443	708,279	0,0443	704,095
0,0447	709,078	0,0447	704,874
0,0451	709,846	0,0451	705,625
0,0455	710,585	0,0455	706,348
0,0459	711,294	0,0459	707,045
0,0463	711,975	0,0463	707,716
0,0467	712,629	0,0467	708,361
0,0471	713,255	0,0471	708,980
0,0475	713,855	0,0475	709,576
0,0479	714,429	0,0479	710,147
0,0483	714,979	0,0483	710,695
0,0487	715,504	0,0487	711,220
0,0491	716,005	0,0491	711,722
0,0495	716,483	0,0495	712,202
0,0499	716,938	0,0499	712,659
0,0503	717,370	0,0503	713,096
0,0507	717,781	0,0507	713,510
0,0511	718,170	0,0511	713,904

0,0516	718,537	0,0516	714,277
0,0520	718,884	0,0520	714,630
0,0524	719,210	0,0524	714,961
0,0528	719,515	0,0528	715,273
0,0532	719,800	0,0532	715,564
0,0536	720,065	0,0536	715,835
0,0540	720,310	0,0540	716,086
0,0544	720,534	0,0544	716,316
0,0548	720,738	0,0548	716,526
0,0552	720,922	0,0552	716,715
0,0556	721,085	0,0556	716,883
0,0560	721,228	0,0560	717,030
0,0564	721,349	0,0564	717,154
0,0568	721,448	0,0568	717,257
0,0572	721,524	0,0572	717,336
0,0576	721,578	0,0576	717,391
0,0580	721,607	0,0580	717,421

**Tabel C.2** Distribusi Temperatur *Circular Finned Tube Superheater* dengan Variasi Tebal *Fin*

Tebal 0.8 mm		Tebal 1 mm		Tebal 1.5 mm	
Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)
0,0318	661,245	0,0318	661,337	0,0318	661,614
0,0322	663,560	0,0322	663,401	0,0322	663,196
0,0326	665,830	0,0326	665,443	0,0326	664,814
0,0330	668,040	0,0330	667,435	0,0330	666,412
0,0334	670,185	0,0334	669,373	0,0334	667,977
0,0338	672,265	0,0338	671,255	0,0338	669,505



0,0342	674,278	0,0342	673,081	0,0342	670,994
0,0346	676,227	0,0346	674,852	0,0346	672,445
0,0350	678,112	0,0350	676,570	0,0350	673,859
0,0354	679,935	0,0354	678,235	0,0354	675,236
0,0358	681,699	0,0358	679,849	0,0358	676,578
0,0362	683,404	0,0362	681,413	0,0362	677,884
0,0366	685,052	0,0366	682,929	0,0366	679,155
0,0370	686,646	0,0370	684,398	0,0370	680,393
0,0374	688,186	0,0374	685,822	0,0374	681,598
0,0378	689,675	0,0378	687,201	0,0378	682,770
0,0382	691,113	0,0382	688,537	0,0382	683,911
0,0385	692,503	0,0387	689,831	0,0385	685,021
0,0389	693,846	0,0391	691,084	0,0389	686,101
0,0393	695,143	0,0395	692,297	0,0393	687,151
0,0397	696,396	0,0399	693,471	0,0397	688,172
0,0401	697,605	0,0403	694,608	0,0401	689,165
0,0405	698,773	0,0407	695,708	0,0405	690,130
0,0409	699,900	0,0411	696,772	0,0409	691,068
0,0413	700,988	0,0415	697,801	0,0413	691,978
0,0417	702,037	0,0419	698,796	0,0417	692,863
0,0421	703,049	0,0423	699,757	0,0421	693,722
0,0425	704,025	0,0427	700,687	0,0425	694,556
0,0429	704,966	0,0431	701,584	0,0429	695,365
0,0433	705,873	0,0435	702,451	0,0433	696,150
0,0437	706,747	0,0439	703,288	0,0437	696,911
0,0441	707,589	0,0443	704,095	0,0441	697,648
0,0445	708,399	0,0447	704,874	0,0445	698,363
0,0449	709,180	0,0451	705,625	0,0449	699,055
0,0453	709,930	0,0455	706,348	0,0453	699,724



0,0457	710,652	0,0459	707,045	0,0457	700,372
0,0461	711,346	0,0463	707,716	0,0461	700,998
0,0465	712,014	0,0467	708,361	0,0465	701,603
0,0469	712,654	0,0471	708,980	0,0469	702,187
0,0473	713,269	0,0475	709,576	0,0473	702,751
0,0477	713,859	0,0479	710,147	0,0477	703,294
0,0481	714,424	0,0483	710,695	0,0481	703,818
0,0485	714,965	0,0487	711,220	0,0485	704,321
0,0489	715,483	0,0491	711,722	0,0489	704,805
0,0493	715,979	0,0495	712,202	0,0493	705,269
0,0497	716,451	0,0499	712,659	0,0497	705,715
0,0501	716,902	0,0503	713,096	0,0501	706,141
0,0505	717,332	0,0507	713,510	0,0505	706,549
0,0509	717,741	0,0511	713,904	0,0509	706,938
0,0513	718,129	0,0516	714,277	0,0513	707,309
0,0516	718,496	0,0520	714,630	0,0516	707,661
0,0520	718,843	0,0524	714,961	0,0520	707,995
0,0524	719,170	0,0528	715,273	0,0524	708,311
0,0528	719,478	0,0532	715,564	0,0528	708,608
0,0532	719,766	0,0536	715,835	0,0532	708,887
0,0536	720,034	0,0540	716,086	0,0536	709,148
0,0540	720,282	0,0544	716,316	0,0540	709,390
0,0544	720,510	0,0548	716,526	0,0544	709,614
0,0548	720,719	0,0552	716,715	0,0548	709,820
0,0552	720,907	0,0556	716,883	0,0552	710,006
0,0556	721,074	0,0560	717,030	0,0556	710,173
0,0560	721,220	0,0564	717,154	0,0560	710,320
0,0564	721,344	0,0568	717,257	0,0564	710,446
0,0568	721,446	0,0572	717,336	0,0568	710,551

0,0572	721,523	0,0576	717,391	0,0572	710,635
0,0576	721,576	0,0580	717,421	0,0576	710,695
0,0580	721,603			0,0580	710,731

**Tabel C.3** Distribusi Temperatur *Circular Finned Tube Superheater* dengan Variasi Lebar *Fin*

Lebar 50.8 mm		Lebar 58 mm		Lebar 65.2 mm	
L (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)
0,0318	660,943	0,0318	661,337	0,065	724,961
0,0322043	662,877	0,0322	663,401	0,0648024	724,952
0,0326085	664,790	0,0326	665,443	0,0644048	724,921
0,0330128	666,655	0,0330	667,435	0,0640071	724,877
0,033417	668,467	0,0334	669,373	0,0636095	724,819
0,0338213	670,224	0,0338	671,255	0,0632119	724,748
0,0342255	671,926	0,0342	673,081	0,0628143	724,666
0,0346298	673,575	0,0346	674,852	0,0624167	724,570
0,035034	675,170	0,0350	676,570	0,0620191	724,464
0,0354383	676,713	0,0354	678,235	0,0616214	724,345
0,0358426	678,205	0,0358	679,849	0,0612238	724,214
0,0362468	679,647	0,0362	681,413	0,0608262	724,072
0,0366511	681,040	0,0366	682,929	0,0604286	723,918
0,0370553	682,386	0,0370	684,398	0,060031	723,753
0,0374596	683,685	0,0374	685,822	0,0596333	723,577
0,0378638	684,939	0,0378	687,201	0,0592357	723,389
0,0382681	686,148	0,0382	688,537	0,0588381	723,189
0,0386723	687,313	0,0387	689,831	0,0584405	722,977
0,0390766	688,436	0,0391	691,084	0,0580429	722,754
0,0394809	689,516	0,0395	692,297	0,0576452	722,519



0,0398851	690,556	0,0399	693,471	0,0572476	722,271
0,0402894	691,555	0,0403	694,608	0,05685	722,012
0,0406936	692,514	0,0407	695,708	0,0564524	721,740
0,0410979	693,434	0,0411	696,772	0,0560548	721,456
0,0415021	694,316	0,0415	697,801	0,0556571	721,159
0,0419064	695,160	0,0419	698,796	0,0552595	720,848
0,0423106	695,967	0,0423	699,757	0,0548619	720,525
0,0427149	696,737	0,0427	700,687	0,0544643	720,188
0,0431192	697,472	0,0431	701,584	0,0540667	719,837
0,0435234	698,170	0,0435	702,451	0,0536691	719,472
0,0439277	698,833	0,0439	703,288	0,0532714	719,092
0,0443319	699,462	0,0443	704,095	0,0528738	718,698
0,0447362	700,056	0,0447	704,874	0,0524762	718,289
0,0451404	700,616	0,0451	705,625	0,0520786	717,864
0,0455447	701,142	0,0455	706,348	0,051681	717,423
0,0459489	701,633	0,0459	707,045	0,0512833	716,966
0,0463532	702,091	0,0463	707,716	0,0508857	716,493
0,0467574	702,515	0,0467	708,361	0,0504881	716,003
0,0471617	702,905	0,0471	708,980	0,0500905	715,495
0,047566	703,260	0,0475	709,576	0,0496929	714,969
0,0479702	703,581	0,0479	710,147	0,0492952	714,424
0,0483745	703,867	0,0483	710,695	0,0488976	713,861
0,0487787	704,116	0,0487	711,220	0,0485	713,278
0,049183	704,329	0,0491	711,722	0,0481024	712,676
0,0495872	704,504	0,0495	712,202	0,0477048	712,053
0,0499915	704,639	0,0499	712,659	0,0473071	711,409
0,0503957	704,734	0,0503	713,096	0,0469095	710,743
0,0508	704,786	0,0507	713,510	0,0465119	710,056
		0,0511	713,904	0,0461143	709,345



	0,0516	714,277	0,0457167	708,611
	0,0520	714,630	0,0453191	707,852
	0,0524	714,961	0,0449214	707,069
	0,0528	715,273	0,0445238	706,261
	0,0532	715,564	0,0441262	705,426
	0,0536	715,835	0,0437286	704,565
	0,0540	716,086	0,043331	703,675
	0,0544	716,316	0,0429333	702,757
	0,0548	716,526	0,0425357	701,810
	0,0552	716,715	0,0421381	700,833
	0,0556	716,883	0,0417405	699,825
	0,0560	717,030	0,0413429	698,784
	0,0564	717,154	0,0409452	697,711
	0,0568	717,257	0,0405476	696,604
	0,0572	717,336	0,04015	695,463
	0,0576	717,391	0,0397524	694,286
	0,0580	717,421	0,0393548	693,072
			0,0389571	691,820
			0,0385595	690,529
			0,0381619	689,198
			0,0377643	687,826
			0,0373667	686,412
			0,0369691	684,954
			0,0365714	683,452
			0,0361738	681,903
			0,0357762	680,306
			0,0353786	678,661
			0,034981	676,964
			0,0345833	675,217

				0,0341857	673,415
				0,0337881	671,560
				0,0333905	669,649
				0,0329929	667,683
				0,0325952	665,662
				0,0321976	663,592
				0,0318	661,502

**Tabel C.4** Distribusi Temperatur *Circular Finned tube Superheater* dengan Variasi Letak Observasi Temperatur

Kiri		Kanan		Atas		Bawah	
Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)
0,0318	660,057	0,0318	660,057	0,0318	656,094	0,0318	661,337
0,0322	661,746	0,0322	661,746	0,0322	656,422	0,0322	663,401
0,0326	663,425	0,0326	663,424	0,0326	656,748	0,0326	665,443
0,0330	665,072	0,0330	665,071	0,0330	657,071	0,0330	667,435
0,0334	666,683	0,0334	666,682	0,0334	657,389	0,0334	669,373
0,0338	668,255	0,0338	668,254	0,0338	657,702	0,0338	671,255
0,0342	669,786	0,0342	669,785	0,0342	658,011	0,0342	673,081
0,0346	671,276	0,0346	671,274	0,0346	658,315	0,0346	674,852
0,0350	672,723	0,0350	672,721	0,0350	658,615	0,0350	676,570
0,0354	674,128	0,0354	674,126	0,0354	658,909	0,0354	678,235
0,0358	675,491	0,0358	675,489	0,0358	659,200	0,0358	679,849
0,0362	676,813	0,0362	676,811	0,0362	659,485	0,0362	681,413
0,0366	678,095	0,0366	678,093	0,0366	659,766	0,0366	682,929
0,0370	679,338	0,0370	679,336	0,0370	660,042	0,0370	684,398
0,0374	680,543	0,0374	680,540	0,0374	660,314	0,0374	685,822
0,0378	681,710	0,0378	681,707	0,0378	660,581	0,0378	687,201



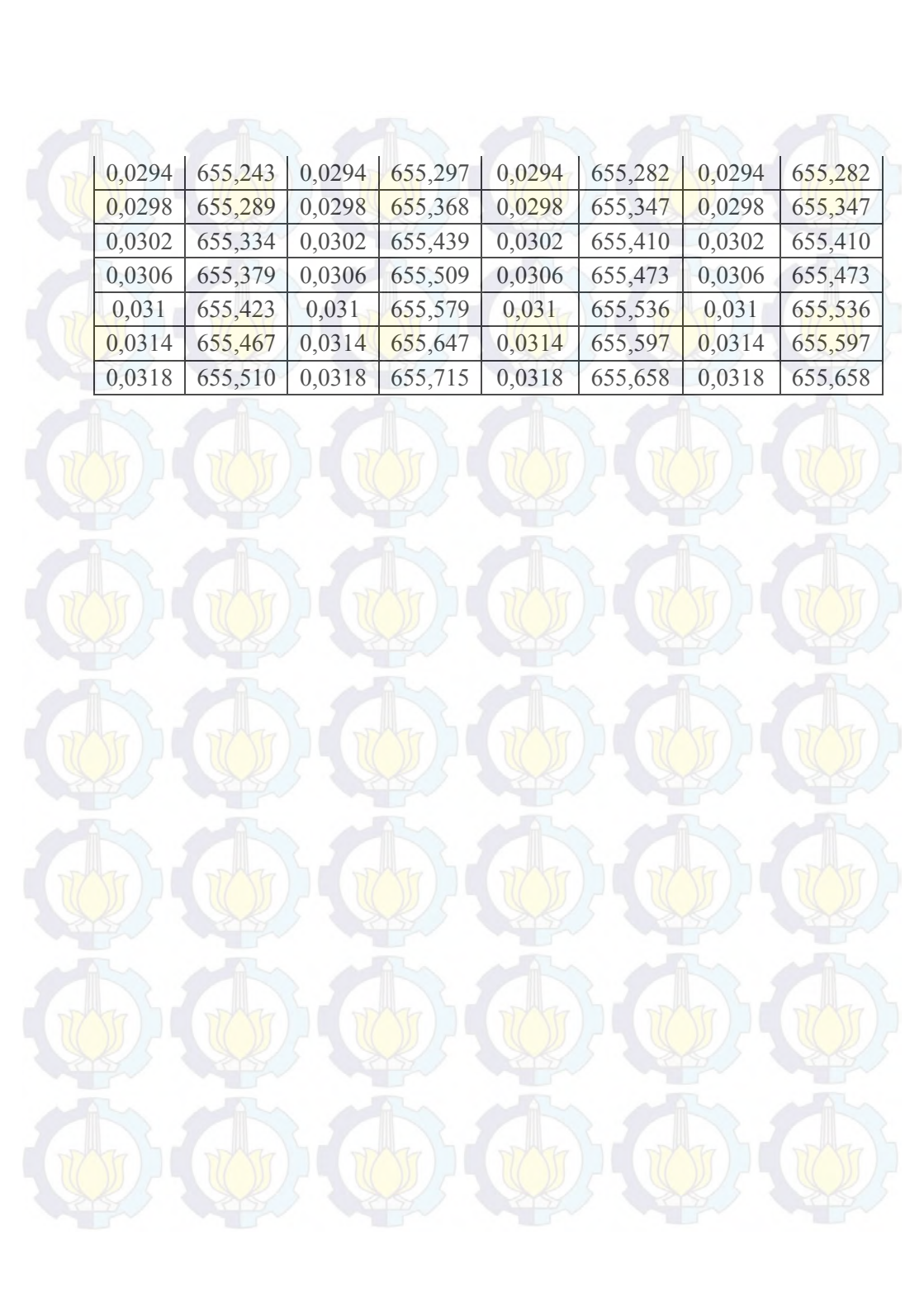
0,0382	682,841	0,0382	682,838	0,0382	660,843	0,0382	688,537
0,0387	683,936	0,0387	683,933	0,0387	661,101	0,0387	689,831
0,0391	684,998	0,0391	684,994	0,0391	661,354	0,0391	691,084
0,0395	686,025	0,0395	686,022	0,0395	661,603	0,0395	692,297
0,0399	687,020	0,0399	687,017	0,0399	661,848	0,0399	693,471
0,0403	687,983	0,0403	687,980	0,0403	662,088	0,0403	694,608
0,0407	688,916	0,0407	688,912	0,0407	662,323	0,0407	695,708
0,0411	689,818	0,0411	689,814	0,0411	662,555	0,0411	696,772
0,0415	690,690	0,0415	690,687	0,0415	662,782	0,0415	697,801
0,0419	691,534	0,0419	691,530	0,0419	663,005	0,0419	698,796
0,0423	692,350	0,0423	692,346	0,0423	663,223	0,0423	699,757
0,0427	693,138	0,0427	693,134	0,0427	663,438	0,0427	700,687
0,0431	693,900	0,0431	693,896	0,0431	663,648	0,0431	701,584
0,0435	694,636	0,0435	694,631	0,0435	663,855	0,0435	702,451
0,0439	695,346	0,0439	695,341	0,0439	664,057	0,0439	703,288
0,0443	696,031	0,0443	696,026	0,0443	664,255	0,0443	704,095
0,0447	696,691	0,0447	696,687	0,0447	664,450	0,0447	704,874
0,0451	697,328	0,0451	697,323	0,0451	664,640	0,0451	705,625
0,0455	697,941	0,0455	697,937	0,0455	664,827	0,0455	706,348
0,0459	698,532	0,0459	698,527	0,0459	665,009	0,0459	707,045
0,0463	699,099	0,0463	699,095	0,0463	665,188	0,0463	707,716
0,0467	699,645	0,0467	699,641	0,0467	665,363	0,0467	708,361
0,0471	700,169	0,0471	700,165	0,0471	665,534	0,0471	708,980
0,0475	700,672	0,0475	700,668	0,0475	665,701	0,0475	709,576
0,0479	701,155	0,0479	701,150	0,0479	665,864	0,0479	710,147
0,0483	701,616	0,0483	701,611	0,0483	666,023	0,0483	710,695
0,0487	702,057	0,0487	702,053	0,0487	666,179	0,0487	711,220
0,0491	702,479	0,0491	702,474	0,0491	666,330	0,0491	711,722
0,0495	702,881	0,0495	702,876	0,0495	666,478	0,0495	712,202



0,0499	703,264	0,0499	703,259	0,0499	666,621	0,0499	712,659
0,0503	703,628	0,0503	703,623	0,0503	666,761	0,0503	713,096
0,0507	703,973	0,0507	703,968	0,0507	666,896	0,0507	713,510
0,0511	704,300	0,0511	704,294	0,0511	667,027	0,0511	713,904
0,0516	704,608	0,0516	704,603	0,0516	667,154	0,0516	714,277
0,0520	704,898	0,0520	704,893	0,0520	667,276	0,0520	714,630
0,0524	705,171	0,0524	705,165	0,0524	667,394	0,0524	714,961
0,0528	705,425	0,0528	705,420	0,0528	667,507	0,0528	715,273
0,0532	705,662	0,0532	705,657	0,0532	667,616	0,0532	715,564
0,0536	705,882	0,0536	705,877	0,0536	667,719	0,0536	715,835
0,0540	706,084	0,0540	706,079	0,0540	667,817	0,0540	716,086
0,0544	706,270	0,0544	706,264	0,0544	667,910	0,0544	716,316
0,0548	706,438	0,0548	706,432	0,0548	667,997	0,0548	716,526
0,0552	706,588	0,0552	706,583	0,0552	668,078	0,0552	716,715
0,0556	706,722	0,0556	706,717	0,0556	668,153	0,0556	716,883
0,0560	706,839	0,0560	706,833	0,0560	668,221	0,0560	717,030
0,0564	706,938	0,0564	706,933	0,0564	668,282	0,0564	717,154
0,0568	707,020	0,0568	707,015	0,0568	668,335	0,0568	717,257
0,0572	707,084	0,0572	707,079	0,0572	668,379	0,0572	717,336
0,0576	707,131	0,0576	707,125	0,0576	668,412	0,0576	717,391
0,0580	707,158	0,0580	707,153	0,0580	668,432	0,0580	717,421

**Tabel C.5** Distribusi *Tube Superheater* dengan Variasi Letak  
Observasi Temperatur

<i>Tube Atas</i>		<i>Tube Bawah</i>		<i>Tube Kanan</i>		<i>Tube Kiri</i>	
Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)	Lebar (mm)	T (K)
0,0286	655,150	0,0286	655,150	0,0286	655,150	0,0286	655,150
0,029	655,197	0,029	655,224	0,029	655,216	0,029	655,216



0,0294	655,243	0,0294	655,297	0,0294	655,282	0,0294	655,282
0,0298	655,289	0,0298	655,368	0,0298	655,347	0,0298	655,347
0,0302	655,334	0,0302	655,439	0,0302	655,410	0,0302	655,410
0,0306	655,379	0,0306	655,509	0,0306	655,473	0,0306	655,473
0,031	655,423	0,031	655,579	0,031	655,536	0,031	655,536
0,0314	655,467	0,0314	655,647	0,0314	655,597	0,0314	655,597
0,0318	655,510	0,0318	655,715	0,0318	655,658	0,0318	655,658

**LAMPIRAN D**  
**TABEL EFISIENSI DAN EFEKTIFITAS *Fin***  
**MENGGUNAKAN PERSAMAAN BESSEL**

**Tabel D.1 Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Tebal *Fin***

	Satuan	<i>Fin</i> Tebal 0.8 mm	<i>Fin</i> Tebal 1 mm	<i>Fin</i> Tebal 1.5 mm
Jari-jari Dalam <i>Fin</i> ( <i>r</i> <sub>1</sub> )	m	0,01590	0,01590	0,01590
Jari-jari Luar <i>Fin</i> ( <i>r</i> <sub>2</sub> )	m	0,02900	0,02900	0,02900
Jari-jari Luar <i>Fin</i> + Tebal <i>Fin</i> ( <i>r</i> <sub>2c</sub> )	m	0,02940	0,02950	0,02975
Koefisien Konveksi ( <i>h</i> )	W/m <sup>2</sup> .K	5,34129	5,86709	6,77216
Tebal <i>Fin</i> ( <i>t</i> )	m	0,00080	0,00100	0,00150
Luas Permukaan <i>Fin</i> ( <i>A<sub>f</sub></i> )	m <sup>2</sup>	0,00384	0,0038811	0,00397
Luas Permukaan <i>Tube</i> ( <i>A<sub>t</sub></i> )	m <sup>2</sup>	0,09694	0,09849	0,10494
<i>m</i>	-	16,04018	15,03636	13,19013
Koefisien Konduksi ( <i>k</i> )	W/m.K	51,90000	51,90000	51,90000
<i>C</i> <sub>2</sub>	-	3,24180	3,42523	3,81318
<i>mr</i> <sub>2c</sub>	-	0,47158	0,44357	0,39241
<i>mr</i> <sub>1</sub>	-	0,25504	0,23908	0,20972
<i>K</i> <sub>1</sub>	-	3,82933	4,10386	4,60876
<i>I</i> <sub>1</sub>	-	0,24265	0,22753	0,20013
<i>K</i> <sub>1</sub> '	-	1,80605	1,95394	2,25022



<b>I1'</b>	-	0,12917	0,12071	0,10515
<b>K0</b>	-	1,54330	1,60411	1,71595
<b>I0</b>	-	1,01716	1,01508	1,01126
<b>Efisiensi <i>Fin</i></b>	%	102,01	101,79	99,84
<b>Efektifitas <i>Fin</i></b>	-	14,32	14,124	13,272

**Tabel D.2 Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Lebar *Fin***

	<b>Satuan</b>	<b><i>Fin</i> Lebar 50.8 mm</b>	<b><i>Fin</i> Lebar 58 mm</b>	<b><i>Fin</i> Lebar 65.2 mm</b>
<b>Jari-jari Dalam <i>Fin</i> (r1)</b>	m	0,0159	0,0159	0,0159
<b>Jari-jari Luar <i>Fin</i> (r2)</b>	m	0,0254	0,029	0,0326
<b>Jari-jari luar <i>Fin</i> + Tebal <i>Fin</i> (r2c)</b>	m	0,0259	0,0295	0,0331
<b>Koefisien Konveksi (h)</b>	W/m <sup>2</sup> K	7,786273	5,867	4,540246
<b>Tebal <i>Fin</i> (t)</b>	m	0,001	0,001	0,001
<b>Luas Permukaan <i>Fin</i> (Af)</b>	m <sup>2</sup>	0,002466	0,003697	0,005091
<b>Luas Permukaan <i>Tube</i> (At)</b>	m <sup>2</sup>	0,000999	0,000999	0,000999
<b>m</b>	-	17,32192	15,03624	13,22729
<b>Koefisien Konduksi (k)</b>	W/m K	51,9	51,9	51,9
<b>C2</b>	-	4,391923	3,425256	2,852539
<b>mr2c</b>	-	0,448638	0,443569	0,437823
<b>mr1</b>	-	0,275419	0,239076	0,210314

<b>K1</b>	-	3,4788	4,103888	4,5986
<b>I1</b>	-	0,230264	0,227527	0,224425
<b>K1'</b>	-	1,927192	1,953955	1,984292
<b>I1'</b>	-	0,139972	0,12071	0,105466
<b>K0</b>	-	1,465655	1,604119	1,713704
<b>I0</b>	-	1,019804	1,01508	1,011341
<b>Efisiensi <i>Fin</i></b>	%	101,326	101,7897	98,1421
<b>Efektifitas <i>Fin</i></b>	-	12,481	13,734	14,954

**Tabel D.3** Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Jenis Material *Fin*

	Satuan	Jenis Material <i>Carbon Steel (Plain Carbon)</i>	Jenis Material <i>Carbon Steel (Carbon + Silicon)</i>
<b>Jari-jari Dalam <i>Fin</i> (r1)</b>	m	0,0159	0,0159
<b>Jari-jari Luar <i>Fin</i> (r2)</b>	m	0,029	0,029
<b>Jari-jari luar <i>Fin</i> + Tebal <i>Fin</i> (r2c)</b>	m	0,0295	0,0295
<b>Koefisien Konveksi (h)</b>	W/m <sup>2</sup> K	5,1891	5,867
<b>Tebal <i>Fin</i> (t)</b>	m	0,001	0,001
<b>Luas Permukaan <i>Fin</i> (Af)</b>	m <sup>2</sup>	0,003697194	0,003697194
<b>Luas Permukaan <i>Tube</i> (At)</b>	m <sup>2</sup>	0,099942857	0,099942857

<b>m</b>	-	15,90996006	15,03624395
<b>Koefisien Konduksi (k)</b>	W/m K	60,5	51,9
<b>C2</b>	-	3,23715332	3,425255684
<b>mr2c</b>	-	0,469343822	0,443569196
<b>mr1</b>	-	0,252968365	0,239076279
<b>K1</b>	-	3,864944121	4,103888006
<b>I1</b>	-	0,241445664	0,227527366
<b>K1'</b>	-	1,81786462	1,953954643
<b>I1'</b>	-	0,128073233	0,120710428
<b>K0</b>	-	1,551190529	1,604119378
<b>I0</b>	-	1,016885887	1,015079916
<b>Efisiensi <i>Fin</i></b>	%	101,982	101,789
<b>Efektifitas <i>Fin</i></b>	-	13,741	13,734



## LAMPIRAN E

### **MODIFIED BESSEL FUNCTION OF FIRST AND SECOND KINDS**

**$I_0, I_1, K_0, K_1$  Values for Various Arguments**

$X$	$I_0(X)$	$I_1(X)$	$K_0(X)$	$K_1(X)$
0	1.0	0	8	8
0.1	1.002	0.05	2.427	9.854
0.2	1.010	0.10	1.753	4.776
0.3	1.023	0.153	1.372	3.056
0.4	1.040	0.204	1.114	2.184
0.5	1.063	0.258	0.924	1.656
0.6	1.092	0.314	0.778	1.303
0.7	1.126	0.372	0.66	1.05
0.8	1.166	0.433	0.565	0.862
0.9	1.213	0.497	0.487	0.716
1.0	1.266	0.565	0.421	0.602
1.2	1.394	0.715	0.318	0.434
1.4	1.553	0.886	0.244	0.321
1.6	1.75	1.085	0.188	0.241
1.8	1.99	1.317	0.146	0.183
2.0	2.28	1.591	0.114	0.140
2.2	2.629	1.914	0.0893	0.108
2.4	3.049	2.298	0.0702	0.0837
2.6	3.553	2.755	0.554	0.0653
2.8	4.157	3.301	0.0438	0.0511
3.0	4.881	3.953	0.0347	0.0402
3.2	5.747	4.734	0.0276	0.0316
3.4	6.785	5.670	0.0220	0.0250
3.6	8.028	6.793	0.0175	0.0198
3.8	9.517	8.140	0.0140	0.0157
4.0	11.30	9.759	0.0112	0.0125
4.2	13.44	11.70	0.0089	0.0099
4.4	16.01	14.04	0.0071	0.0079
4.6	19.09	16.86	0.0057	0.0063
4.8	22.79	20.25	0.0046	0.0050
5.0	27.24	24.34	0.0037	0.0040

Source: Ganapathy, V., *Applied Heat Transfer*,  
Pennwell Books, Tulsa, OK, 1982, p501.

## LAMPIRAN F

### TABEL EFISIENSI DAN EFEKTIFITAS FIN MENGUNAKAN PENDEKATAN KONVEKSI

**Tabel F.1** Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Tebal *Fin*

Tube Default			Fin Tube T = 0.8MM			Fin 1 MM			Fin Tube T = 1.5MM		
Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan
D out Tube	0,032	m	D out Fin	0,058	m	D out Fin	0,058	m	D out Fin	0,058	m
D in Tube	0,029	m	D in Fin	0,032	m	D in Fin	0,032	m	D in Fin	0,032	m
T Tube	0,001	m	T Fin	0,001	m	T Fin	0,001	m	T Fin	0,002	m
A Tube out	0,000	m2	A Side Fin	0,004	m2	A Side Fin	0,004	m2	A Side Fin	0,004	m2
A Tube in	0,000	mm2	A Tip Fin	0,000	m2	A Tip Fin	0,000	m2	A Tip Fin	0,000	m2
T Tube out	655,381	K	A Total Fin	0,004	m2	A Total Fin	0,004	m2	A Total Fin	0,004	m2
T Infinite Tube	733,811	K	T base	659,052	K	T base	659,197	K	T base	659,073	K
h Tube	18,698	W/m2.K	T Average	691,456	K	T Average	688,256	K	T Average	682,497	K
q Tube	0,147	W	T Infinite Fin	725,799	K	T Infinite Fin	725,447	K	T Infinite Fin	723,891	K
			h Fin	5,341	W/m2.K	h Fin	5,867	W/m2.K	h Fin	6,772	W/m2.K
			q Fin	0,705	W	q Fin	0,847	W	q Fin	1,113	W
			q Max	1,370	W	q Max	1,508	W	q Max	1,743	W
			Efektifitas Fin	4,810		Efektifitas Fin	5,776		Efektifitas Fin	7,594	
			Efisiensi Fin	51,452	%	Efisiensi Fin	56,137	%	Efisiensi Fin	63,862	%

**Tabel F.2** Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Lebar *Fin*

Tube Default			Lebar Fin 50.8 mm			Lebar Fin 58 mm			Lebar Fin 65.2 mm		
Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan
D out Tube	0,032	m	D out Fin	0,051	m	D out Fin	0,058	m	D out Fin	0,065	m
D in Tube	0,029	m	D in Fin	0,032	m	D in Fin	0,032	m	D in Fin	0,032	m
T Tube	0,001	m	T Fin	0,001	m	T Fin	0,001	m	T Fin	0,001	m
A Tube out	0,000	m2	A Side Fin	0,002	m2	A Side Fin	0,004	m2	A Side Fin	0,005	m2
A Tube in	0,000	mm2	A Tip Fin	0,000	m2	A Tip Fin	0,000	m2	A Tip Fin	0,000	m2
T Tube out	655,381	K	A Total Fin	0,003	m2	A Total Fin	0,004	m2	A Total Fin	0,005	m2
T Infinite Tube	733,811	K	T base	658,616	K	T base	659,197	K	T base	659,396	K
h Tube	18,698	W/m2.K	T Average	678,643	K	T Average	688,518	K	T Average	696,099	K
q Tube	0,147	W	T Infinite Fin	725,548	K	T Infinite Fin	725,447	K	T Infinite Fin	727,465	K
			h Fin	7,786	W/m2.K	h Fin	5,867	W/m2.K	h Fin	4,540	W/m2.K
			q Fin	0,959	W	q Fin	0,841	W	q Fin	0,754	W
			q Max	1,368	W	q Max	1,508	W	q Max	1,637	W
			Efektifitas Fin	6,543		Efektifitas Fin	5,735		Efektifitas Fin	5,146	
			Efisiensi Fin	70,079	%	Efisiensi Fin	55,742	%	Efisiensi Fin	46,079	%

**Tabel F.3 Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Jenis Material  
Fin**

Tube Default			Fin Tube Carbon Steel (Plain Carbon)			Fin Tube Carbon Steel (carbon + silicon)		
Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan
D out Tube	0,0318	m	D out Fin	0,058	m	D out Fin	0,058	m
D in Tube	0,0286	m	D in Fin	0,0318	m	D in Fin	0,0318	m
T Tube	0,001	m	T Fin	0,001	m	T Fin	0,001	m
A Tube out	9,99429E-05	m <sup>2</sup>	A Side Fin	0,003697	m <sup>2</sup>	A Side Fin	0,003697	m <sup>2</sup>
A Tube in	8,98857E-05	mm <sup>2</sup>	A Tip Fin	0,000182	m <sup>2</sup>	A Tip Fin	0,000182	m <sup>2</sup>
T Tube out	655,59656	K	A Total Fin	0,003879	m <sup>2</sup>	A Total Fin	0,003879	m <sup>2</sup>
T Infinite Tube	733,8113	K	T base	659,628	K	T base	659,197	K
h Tube	18,697903	W/m <sup>2</sup> .K	T Average	691,6478	K	T Average	688,2563	K
q Tube	0,146161594	W	T Infinite Fin		K	T Infinite Fin	725,4471	K
			h Fin	5,189114	W/m <sup>2</sup> .K	h Fin	5,867094	W/m <sup>2</sup> .K
			q Fin	0,691696	W	q Fin	0,84651	W
			q Max	1,336287	W	q Max	1,507928	W
			Efektifitas Fin	4,732408		Efektifitas Fin	5,791605	
			Efisiensi Fin	51,76256	%	Efisiensi Fin	56,13731	%



## LAMPIRAN G

### TABEL EFISIENSI DAN EFEKTIFITAS *FIN* MENGUNAKAN PENDEKATAN KONDUKSI

**Tabel G.1** Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Tebal *Fin*

Tube Default			Fin Tube T = 0.8MM			Fin 1 MM			Fin Tube T = 1.5MM		
Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan
r out Tube	0,064	m	r out Tube	0,116	m	r out Tube	0,116	m	r out Tube	0,116	m
r in Tube	0,057	m	r in Tube	0,064	m	r in Tube	0,064	m	r in Tube	0,064	m
T Tube	0,001	m	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>
A Tube out	0,200	m <sup>2</sup>	T base	659,052	K	T base	659,197	K	T base	659,073	K
A Tube in	0,180	mm <sup>2</sup>	T Tip	703,110	K	T Tip	699,038	K	T Tip	691,583	K
T Tube in	655,150	K	T infinite	725,799	K	T infinite	725,447	K	T infinite	723,891	K
T tube out	659,628	K	k Fin	51,900	W/m.K	k Fin	51,900	W/m.K	k Fin	51,900	W/m.K
k Tube	51,900	W/m.K	q Fin	645,350	W	q Fin	583,567	W	q Fin	476,196	W
q Tube	46,456	W	q Max	977,696	W	q Max	970,404	W	q Max	949,427	W
			Efektifitas Fin	13,892		Efektifitas Fin	12,562		Efektifitas Fin	10,250	
			Efisiensi Fin	66,007	%	Efisiensi Fin	60,137	%	Efisiensi Fin	50,156	%

**Tabel G.2** Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Lebar *Fin*

Tube Default			Lebar Fin 50.8 mm			Lebar Fin 58 mm			Lebar Fin 65.2 mm		
Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan
r out Tube	0,064	m	r out Tube	0,116	m	r out Tube	0,116	m	r out Tube	0,116	m
r in Tube	0,057	m	r in Tube	0,064	m	r in Tube	0,064	m	r in Tube	0,064	m
T Tube	0,001	m	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>
A Tube out	0,200	m <sup>2</sup>	T base	658,616	K	T base	659,197	K	T base	659,396	K
A Tube in	0,180	mm <sup>2</sup>	T Tip	687,130	K	T Tip	699,038	K	T Tip	707,968	K
T Tube in	655,150	K	T infinite	725,548	K	T infinite	725,447	K	T infinite	727,465	K
T tube out	659,628	K	k Fin	51,900	W/m.K	k Fin	51,900	W/m.K	k Fin	51,900	W/m.K
k Tube	51,900	W/m.K	q Fin	417,655	W	q Fin	583,567	W	q Fin	711,468	W
q Tube	46,456	W	q Max	980,395	W	q Max	970,404	W	q Max	997,044	W
			Efektifitas Fin	8,990		Efektifitas Fin	12,562		Efektifitas Fin	15,315	
			Efisiensi Fin	42,601	%	Efisiensi Fin	60,137	%	Efisiensi Fin	71,358	%

**Tabel G.3 Efisiensi dan Efektifitas dengan Variasi Jenis Material  
*Fin***

Tube Default			Fin Tube Carbon Steel (Plain Carbon)			Fin Tube Carbon Steel (carbon + silicon)		
Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan	Dimensi	Nilai	Satuan
r out Tube	0,064	m	r out Tube	0,116	m	r out Tube	0,116	m
r in Tube	0,057	m	r in Tube	0,064	m	r in Tube	0,064	m
T Tube	0,001	m	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>	A Fin	0,282	m <sup>2</sup>
A Tube out	0,200	m <sup>2</sup>	T base	659,628	K	T base	659,197	K
A Tube in	0,180	mm <sup>2</sup>	T Tip	703,180	K	T Tip	699,038	K
T Tube in	655,150	K	T infinite	726,007	K	T infinite	725,447	K
T Tube out	659,628	K	k Fin	60,500	W/m.K	k Fin	51,900	W/m.K
k Tube	51,900	W/m.K	q Fin	743,633	W	q Fin	583,567	W
q Tube	46,456	W	q Max	1133,416	W	q Max	970,404	W
			Efektifitas Fin	16,007		Efektifitas Fin	12,562	
			Efisiensi Fin	65,610	%	Efisiensi Fin	60,137	%

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Jakarta, 20 September 1993, merupakan anak pertama dari 4 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Tunas Jakasampurna Bekasi, SD Tunasjakasampurna Bekasi, SMP Negeri 1 Bekasi, dan SMA Negeri 1 Bekasi. Penulis mengikuti SNMPTN Tulis dan diterima di jurusan Teknik Mesin FTI-ITS pada tahun 2011.

Di Jurusan Teknik Mesin ini, Penulis mengambil Bidang Studi

Konversi Energi, Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa. Penulis pernah mengikuti organisasi kemahasiswaan di Kementerian Sosial Masyarakat Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) ITS. Untuk semua informasi dan masukan dapat menghubungi penulis melalui email [igdeagung93@gmail.com](mailto:igdeagung93@gmail.com).